

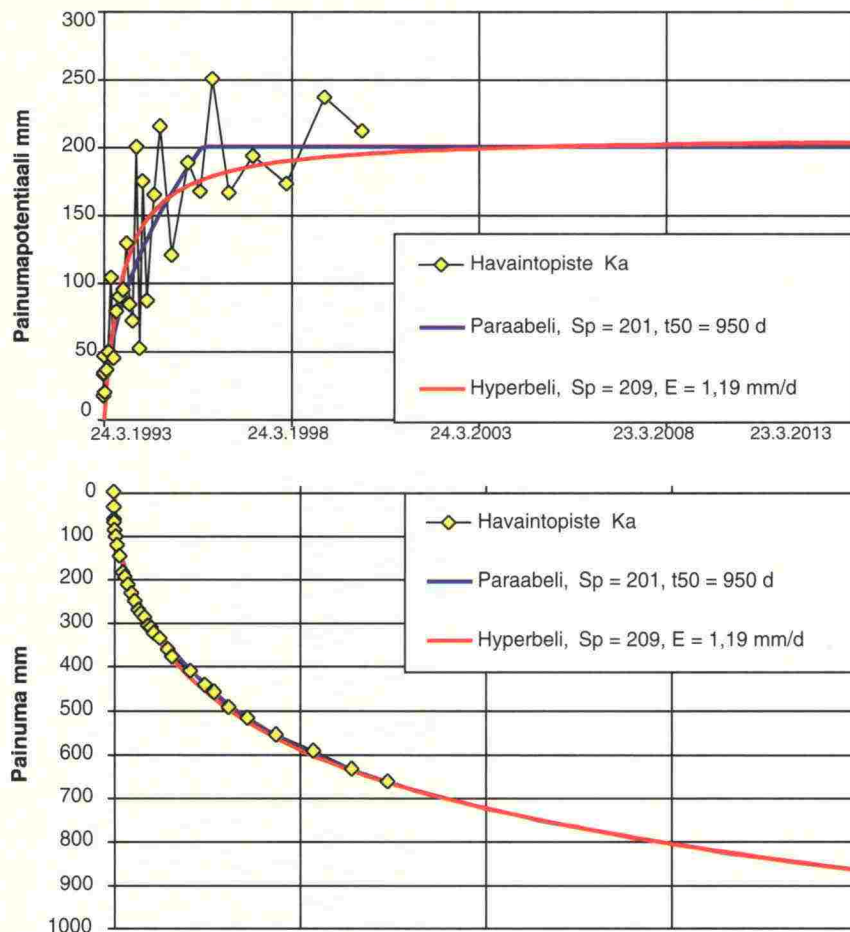


TIEHALLINTO

Tim Länsivaara

Painuman ennustaminen painumahavaintojen perusteella

Tiehallinnon selvityksiä 49/2001



Murron koepenger. Painumapotentiaalimenetelmän mukainen painuma-arvio 7,4 vuoden painumahavaintojen perusteella.

Tim Länsivaara

Painuman ennustaminen painumahavaintojen perusteella

Tiehallinnon selvityksiä 49/2001

TIEHALLINTO
Helsinki 2001

ISSN 1457-9871
ISBN 951-726-797-5
TIEH 3200695

Edita Oyj
Helsinki 2001

Julkaisua myy:
Tiehallinto, julkaisumyynti
Telefaksi 0204 22 2652
e-mail julkaisumyynti@tiehallinto.fi



TIEHALLINTO
Tie- ja liikennetekniikka
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelinvaihte 0204 22 150

TIIVISTELMÄ

Painumalaskelmien epätarkkuus edellyttää usein niiden tarkentamista painumahavaintojen perusteella. Tässä raportissa on tutkittu Janbun (Janbu 1991) esittämän painumapotentialimenetelmän soveltuvuutta painumavarion tekemiseen. Painumapotentialimenetelmää on myös kehitetty edelleen, minkä lisäksi työssä käsitellään myös Suomessa aikaisemmin käytössä olleita Asaokan menetelmää (Asaoka 1978) ja hyperbelimenetelmää (Korhonen 1977).

Kaikkiaan 11 eri kohteen painumahavainnot analysoitiin tarkasteltavilla menetelmillä. Painumahavaintopisteitä tarkasteluissa oli 60 kpl. Kohteiden rakenteet käsittivät koepenkereitä, tiepenkereitä, piha-alueita, täyttöjä sekä rakennuksia. Pohjasuhteet vaihtelivat silttisestä savesta turpeeseen. Suurin osa kohteista oli perustettu vahvistamattoman pohjamaan varaan, mutta osalla kohteista oli käytetty pystyjoitusta tai stabilointia. Eri menetelmien soveltuvuutta tutkittiin tekemällä painuma-arvio eri aika-välein tehtyjen havaintojen perusteella. Aikavälit olivat soveltuvien osien 6 kk, 1 v, 2 v, 4 v ja 8 v. Kohteiden painumahavainnot jaettiin kyseisiin aikaväleihin ja painuma-arviot tehtiin alkaen pienemmästä havaintoajasta. Painuma-arviot tehtiin kohteen pisimmälle havaintoajalle ja saatuja tuloksia verrattiin toteutuneisiin painumiin.

Tarkasteltavista menetelmistä selvästi parhaimmat tulokset saatiin painumapotentialimenetelmällä. Tulokset osoittivat, että menetelmällä saatiin yleensä hyvin luotettava painuma-arvio jo yhden vuoden painumahavaintojen perusteella. Painumapotentialin arvioimiseen painuma-ajan alussa käytettiin kahta eri menetelmää, jotka nimettiin paraabelisovitukseksi ja hyperbelisovitukseksi. Näiden sovitusten käyttö yhdessä osoittautui hyväksi ratkaisuksi menetelmien täydentäessä toisiaan.

Asaokan menetelmä toimi huonosti tarkasteltavissa kohteissa. Menetelmän parametrien sovitustapa antaa helposti liian hyvän kuvan menetelmän sopivuudesta havaintoaineistoon. Hyperbelimenetelmällä saatiin parempia tuloksia kuin Asaokan menetelmällä mutta yleensä kuitenkin selvästi huonompia kuin painumapotentialimenetelmällä. Hyperbelimenetelmä antoi silmämääräisesti usein melko hyvän sovituksen painumahavaintoihin. Se ei kuitenkaan yleensä kyennyt ennustamaan tulevia painuma kovinkaan pitkälle. Sekä hyperbelimenetelmä, että erityisesti Asaokan menetelmä vaativat melko pitkän havaintoajan ennen kuin niillä saatiin luotettava painuma-arvio. Yleensä kumpikin menetelmä aliarvioi painumia.

Key words geotechnical calculations, settlements, clay

ABSTRACT

Settlement observations sometimes reveals inadequacies in settlement calculations that needs to be improved. Many times it is better to use an observational approach for further settlement predictions rather than try to improve the incorrect calculations. In this report the settlement potential method by Janbu (1991) is studied and further developed. In addition the method by Asaoka (1978) and the hyperbolic method presented by Korhonen (1977) is presented for comparison.

Settlement observations from 11 different sites were analysed, numbering a total on 60 settlement points. Studied structures included test and road embankments, yards, fills and buildings. The soil conditions varied from silty clay to soft peat. In major part the structures were founded directly on the subsoil, in addition vertical drains and deep stabilisation were used in some of the sites.

The methods were compared by making settlement predictions in chronological order for different observation times. The predictions were made for the longest observational time and the results were compared to the observed settlement.

Clearly best results were obtained with the settlement potential method. In most cases a very accurate estimation were obtained after a observation time of one year. As the method has its bases in classical theories it also gives field estimations of some soil parameters. Similarly laboratory results may be used to evaluate the parameters for the method. A parabolic and a hyperbolic estimation for the settlement potential were used to account for the non constant value of settlement potential at the initial part of the observations. This proved to be a good solution as the methods complemented each other.

The Asaoka method worked poorly for the cases studied. The way of evaluating the parameters for the method give a much too optimistic picture of its usability. The method failed to give reliable settlement predictions.

The hyperbolic method gave somewhat better results than the Asaoka method, but clearly poorer than the settlement potential method. Although an visually good fit it usually managed to predict the settlements only for a relatively short period of time. The hyperbolic method also needed a relatively long observation time before it gave reliable settlement predictions.

ALKUSANAT

Suunnitteluvaiheessa laaditut painumaennusteet on yleensä tarkoituksenmukaista ja useissa tapauksissa välttämätöntäkin tarkistaa työn aikana tehtyjen painumahavaintojen perusteella. Tällöin on vielä mahdollista pohjarakenteita muuttamalla vaikuttaa tien tasaisuuteen ja rakentamisen kustannuksiin.

Tässä työssä on tutkittu Janbun (Janbu 1991) kehittämän painumapotentialimenetelmän soveltuvuutta painuman ennustamiseen. Painumapotentialimenetelmää on tutkittu kahdella eri käyräsovituksella (paraabeli- että hyperbelisovitukset). Vertailun vuoksi on tutkittu myös kahta nykyisin käytössä olevaa menetelmää: Asaoka menetelmää (Asaoka 1978) ja hyperbelimenetelmää (Korhonen 1977). Painumapotentialimenetelmän ennustamistarkkuus on tehtyjen 11 kohteen analysoinnin perusteella parempi kuin tähän asti käytössä olleiden menetelmien.

Työn on tehnyt Tim Länsivaara SCC Viatek Oy:stä. Työtä on valvonut työryhmä, jonka jäseninä ovat olleet Mikko Smura ja Panu Tolla Tieliikelaitoksen konsultoinnista, Osmo Korhonen Helsingin kaupungin geotekniseltä osastolta sekä Pentti Salo Tiehallinnosta.

Painumaennusteiden laatimista varten on Tim Länsivaara laatinut ENNUSTAJA -nimisen laskentaohjelman. Ohjelman avulla voidaan jäljellä olevaa painumaa arvioida kaikilla tässä julkaisussa tutkituilla menetelmillä. Ohjelman versio 1.0 on tallennettu takakannen taskusta löytyvälle CD-levylle. Ohjelman voi ladata myös internetistä Tiehallinnon sivulta http://www.tiehallinto.fi/julkaisut/lista_muut.htm.

Julkaisun liitteiden lukumäärä on kaikkiaan 12 kappaletta. Koska liitteitä on runsaasti, on vain osa niistä eli liite I ja liitteen II 15 ensimmäistä sivua julkaistu paperimuodossa. Kaikki liitteet löytyvät CD-levyltä PDF -tiedostona.

Helsingissä syyskuussa 2001

Tiehallinto

Tie- ja liikennetekniikka

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	7
2 PAINUMAPOTENTIAALIMENETELMÄ	7
2.1 Janbun hiipumateoria	7
2.2 Painumapotentiaali	9
2.3 Painumien ennustaminen painumapotentiaalin avulla	10
2.3.1 Painumapotentiaalin approksimointi	10
2.3.2 Aika-painuman approksimointi	13
2.3.3 Painumaennusteen laatiminen	14
3 MUUT MENETELMÄT	16
3.1 Johdanto	16
3.2 Asaokan menetelmä	16
3.3 Hyperbelimenetelmä	18
4 PAINUMA-ARVIOMENETELMIEN TESTAUS	20
4.1 Yleistä	20
4.2 Kohteet	20
4.2.1 Yleistä	20
4.2.2 Koepenger Seinäjoki, Murro	21
4.2.3 Haarajoen koepenger	38
4.2.4 Vaasan koepenger	44
4.2.5 Paimion koepenger	47
4.2.6 Keravan veturitalli ja kääntölava	50
4.2.7 Naantali-Turku Mt 189	60
4.2.8 Leteensuon koerakenteet	65
4.2.9 Vanhankaupungin lahti	69
4.2.10 Itäkeskuksen päiväkot	72
4.2.11 Pikku-Huopalahti 1, Tilkan kaava-alue	75
4.2.12 Pikku-Huopalahti 2, Korppaanmäentie	80
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	83
6 KIRJALLISUUTTA	85
7 LIITTEET	87

1 JOHDANTO

Rakenteiden käytön aikaisten painumien seuranta on tärkeätä sekä rakenteen toimintakyvyn arvioimisen kannalta, että käytettyjen mitoitusmenetelmien ja otaksumien arvioimisen kannalta. Aika-ajoin ne tuovat esiin puutteita ja virheitä tehdyissä painumalaskennoissa. Mikäli painumamittaukset osoittavat, että tehdyt painumalaskennat ovat virheellisiä tulee tehtyjä painuma-arvioita pystyä parantamaan. Yksi mahdollisuus on tehdä uusi painumalaskenta korjatuilla parametreillä. Parametrien uudelleen arvioimiseen ei kuitenkaan yleensä ole uusia tuloksia eikä näin ollen välttämättä rationaalisia perusteita. Menettelystä tuleekin helpolla käyränsovitusta ilman todellista pohjaa. Toinen, ja usein ehkä parempikin tapa on hyödyntää tehtyjä mittauksia ja tehdä uusi aika-painuma arvio suoraan niiden avulla. Tällaisia, painumahavaintoja hyödyntäviä menetelmiä on esitetty lukuisia. Tässä selvityksessä esitellään, ja pyritään edelleen kehittämään, Janbun (1991) esittämää painumapotentialimenetelmää. Menetelmän hyvänä puolena on, että sen taustalla on klassinen aika-painumateoria. Menetelmä ei näin ollen ole ainoastaan käyrän sovitusta ja sen avulla voidaan arvioida myös maaparametrejä. Painumapotentialimenetelmän lisäksi työssä esitellään myös lyhyesti Suomessa enemmän käytetyt Asaokan menetelmä (Asaoka 1978) ja hyperbelimenetelmä (Korhonen 1977).

2 PAINUMAPOTENTIALIMENETELMÄ

2.1 Janbun hiipumateoria

Painumapotentialimenetelmä perustuu Janbun esittämään hiipumateoriaan. Koska tämä ei ole Suomessa yleisesti tunnettu on perusteltua esittää se ennen varsinaista painumapotentialikäsitettä.

Koska varsinaisessa hiipumassa huokosylipaine on nolla voidaan aika t käsitellä vaikutuksena ja muodonmuutos ε (hiipuma) vasteena. Aikavastus R voidaan tällöin määrittää yhtälön (1) avulla.

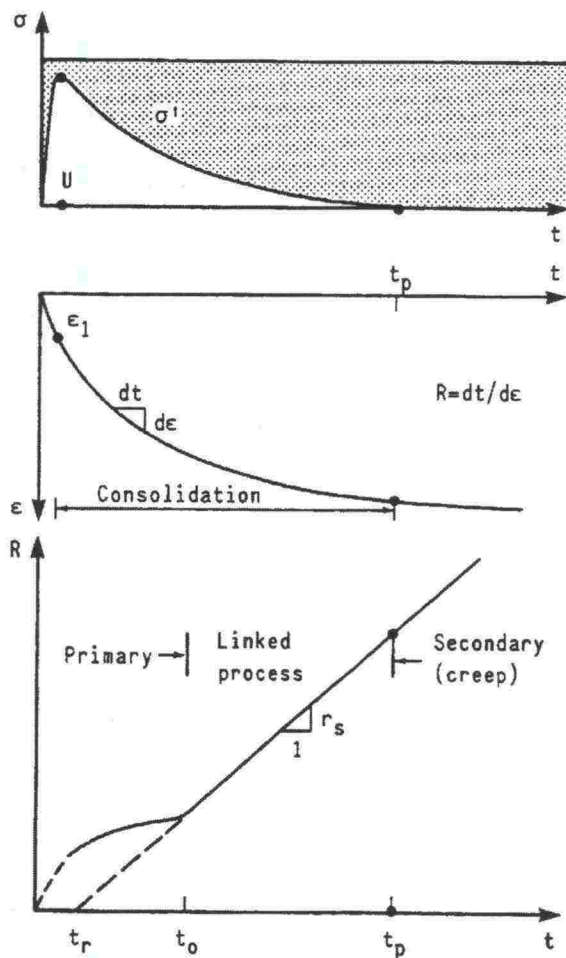
$$R = \frac{dt}{d\varepsilon} \quad (1)$$

Aikavastus R on siis aika-kokoonpuristumakuvaajan tangentti. Kokemus on osoittanut, että tietyn ajan t_0 jälkeen aikavastus R kasvaa lähes lineaarisesti ajan suhteen, kuva 1. Ajan t_0 jälkeen aikavastus voidaan siten esittää yhtälön (2) avulla.

$$R = r_s \cdot (t - t_r) \quad , t > t_0 \quad (2)$$

missä r_s = dimensioton hiipumaluku

Useimmiten referenssiaika $t_r \approx 0$. Kokemus on myös osoittanut, että aika t_0 on yleensä huomattavasti pienempi kuin primaarikonsolidaatioaika t_p . Toisin sanoen hiipumaluvun avulla voidaan kuvata käyttäytymistä jo melko aikaisessa vaiheessa.



Kuva 1. Aikavastuksen R ja hiipumaluvun r_s määritelmät, Janbu (1998).

Mikäli $t_r = 0$ saadaan hiipumaluvun r_s ja sekundaaripainumaparametrin C_α välille seuraava yhteys:

$$r_s = \frac{1+e_0}{C_\alpha} \ln 10 \quad (3)$$

2.2 Painumapotentiaali

Olettamalla, että aikavastus $R = 1/\varepsilon = r_s \cdot t$ kun $t > t_0$, saadaan painuma aikavälillä $t_0 \dots t$ yhtälöstä (4):

$$\delta = \int_{t_0}^t \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \cdot H dt = \int_{t_0}^t \frac{H}{r_s \cdot t} dt = \frac{H}{r_s} \ln \frac{t}{t_0} = S \ln \frac{t}{t_0} \quad (4)$$

missä $S = H/r_s =$ painumapotentiaali

Kerroksellisella maapohjalla, jossa on n kerrosta joiden paksuus on ΔH , saadaan:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta H}{r_s} \quad (5)$$

Kerroksessa, jossa hiipumaluku r kasvaa arvosta r_0 arvoon r_b saadaan:

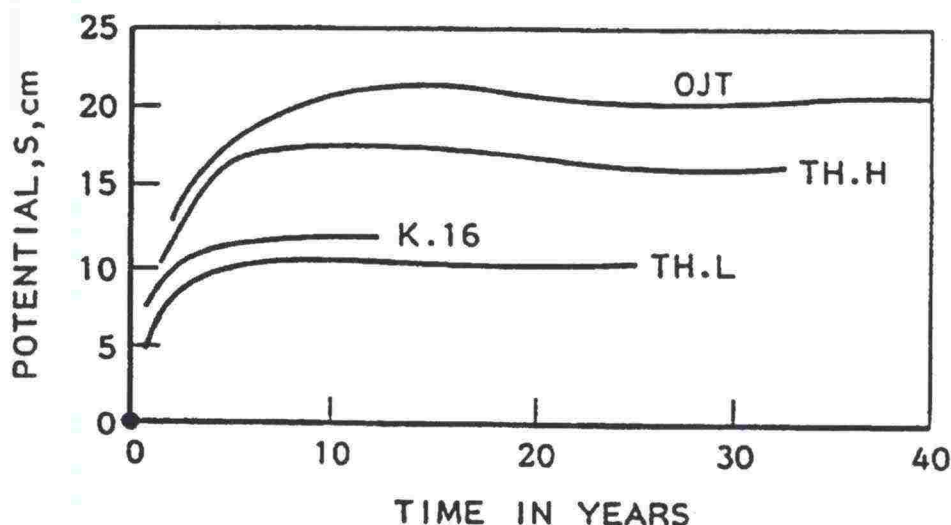
$$S = \frac{H}{r_b - r_0} \ln \frac{r_b}{r_0} \quad (6)$$

Yhtälöstä (4) havaitaan, että painumapotentiaalille pätee myös yhtälö (7).

$$S = \dot{\delta} \cdot t \quad (7)$$

missä $\dot{\delta} = \Delta \delta / \Delta t$ painumisnopeus
 $t =$ aika

Painumapotentiaalın yksikkö on pituus. Janbu on analysoinut lukuisia painumahavaintokohteita (Janbu 1991, 1994, 1995, 1998), ja havainnut, että painumapotentiaali saavuttaa tietyn ajan jälkeen yleensä vakioarvon. Kuvas-
sa 2 on esitetty painumapotentiaalit neljästä talokohteesta Norjassa (Janbu 1994). Janbu onkin esittänyt, että painumapotentiaalın avulla voidaan hyvin arvioida painumia sen jälkeen, kun se on saavuttanut vakioarvon. Lisäksi menetelmän avulla voidaan määrittää myös hiipumaluku r_s mitatuista painumista yhtälön (5) avulla.



Kuva 2. Painumapotentiaalin arvot neljässä talokohteessa (Janbu 1994).

2.3 Painumien ennustaminen painumapotentiaalin avulla

2.3.1 Painumapotentiaalin approksimointi

Kuten luvussa 2.2 todettiin, voidaan painumia tietyn painumisajan jälkeen ennustaa mitatuista painumista lasketun vakio painumapotentiaalin avulla. Usein kuitenkin kestää vuosia, kunnes painumapotentiaali saavuttaa vakioarvonsa. Seuraavassa esitetään kaksi menetelmää, joilla voidaan arvioida painumapotentiaalia ja painumia ennen kuin painumapotentiaali on saavuttanut vakioarvon.

Paraabelisovitus

Klassisen teorian mukaan primaarikonsolidoituminen on aluksi lineaarista painuma - neliöjuuri aika asteikolla. Aikavastus R on tämän perusteella paraabeli kun $t < t_0$. Klassisen teorian likiratkaisun mukaan painumaa voidaan konsolidaation alkuvaiheessa approksimoida yhtälön (8) avulla.

$$\delta_p(t) = \alpha \cdot \frac{q}{M} \sqrt{c_v \cdot t} \quad (8)$$

missä α = kerroin
 q = kuorma
 M = kokoonpuristuvuusmoduuli
 c_v = konsolidaatiokerroin

Vakiokuorman q ideaalitapaukselle (A-jakautuma) kertoimen α arvo on $2/\sqrt{\pi} \approx 1,13$ ja yhtälö on voimassa kun konsolidaatioaste $U < 0,55$. Lineaarille kolmiojakautumalle $\alpha = 1,0$ kun $U < 0,50$ ja paraabelijakautumalle $\alpha = 0,97$ kun $U < 0,3$.

Yhdistämällä yhtälöt (7) ja (8) ja olettamalla, että yhtälö (8) on voimassa kun $t \leq t_{50}$ saadaan painumapotentialille lauseke (9), Janbu (1998).

$$S_p = \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{q}{M} \sqrt{c_v \cdot t} = \frac{1}{2} \delta_p(t) = \frac{1}{4} \delta_p \sqrt{\frac{t}{t_{50}}} \quad (9)$$

missä t_{50} = 50 % konsolidaatioasteen saavuttamiseen kuluva aika

Painumapotentiali on tämän mukaan myös paraabeli konsolidaatiopainuman alkuvaiheessa, ja sen arvo ajanhetkellä t_{50} on $S_p(t_{50}) = 1/4 \delta_p$. Jos oletetaan, että primaarivaihe ja hiipumavaihe voidaan yhdistää ajanhetkellä $t_{50} = t_0$ saadaan painumapotentialin vakio arvo siten yhtä suureksi kuin neljäsosa kokonaisprimaaripainumasta. Vaihtoehtoisesti voidaan tämän avulla arvioida, että kokonaisprimaaripainuma on neljä kertaa painumapotentialin vakio arvo. Painumapotentialille on näin saatu yhtälö (10).

$$S_p = \begin{cases} S_{p0} \cdot \sqrt{\frac{t}{t_{50}}} & t \leq t_{50} \\ S_{p0} & t > t_{50} \end{cases} \quad (10)$$

missä S_{p0} = painumapotentialin vakioarvo.
 t = aika

Periaatekuva paraabelisovituksen mukaisesta painumapotentialin approksimoinnista on esitetty kuvassa 3. Sovittamalla mittaustuloksiin yhtälön (10) mukainen käyrä, eli määrittämällä t_{50} siten, että yhtälö (10) kuvaa mittaustuloksia mahdollisimman hyvin, voidaan sovituksen avulla arvioida myös konsolidaatiokertoimen arvoa. Konsolidaatioteorian mukaan saadaan aika t dimensiottomassa muodossa ratkaistusta konsolidaatioyhtälöstä yhtälön (11) avulla.

$$t = T_v \frac{H^2}{c_v} \quad (11)$$

missä T_v = aikakerroin
 H = painuvan kerroksen paksuus

Aikakerroimen T_v arvo saadaan konsolidaatioyhtälön ratkaisusta halutulla konsolidaatioasteella ja jakautumalla. Jakautuman arvioimisessa tulisi käyttää ensisijaisesti muodonmuutosjakautumaa eikä huokospainejakautumaa. Jakautuman muoto on aina tapauskohtainen. Koska tässä on kyseessä konsolidaatiokertoimen kenttäapproksimaatio, voidaan todellista jakautumaa arvioida riittävällä tarkkuudella lineaarisella kolmion muotoisella jakautumalla. Tällöin saadaan aikakerroimen arvoksi $T_v = 0,091$ yläpuolisella kuivatuksella ja $T_v = 0,049$ kaksipuolisella kuivatuksella. Kummassakin tapauksessa H on painuvan kerroksen todellinen paksuus.

Hyperbelisovitus

Toinen tapa painumapotentiaalin arvioimiseen on käyttää yhtälön (12) mukaista hyperbeliä.

$$S_p = \frac{t}{a + b \cdot t} \quad (12)$$

Painumapotentiaalin maksimi-arvo saadaan ottamalla yhtälöstä (12) raja-arvo ajan t lähestyessä ääretöntä.

$$S_{pmaks} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t}{a + b \cdot t} = \frac{1}{b} \quad (13)$$

Parametri b :n käänteisluku on toisin sanoen painumapotentiaalin maksimi-arvo. Painumapotentiaalin muutos ajan suhteen saadaan derivoimalla yhtälö (12) ajan suhteen, jolloin saadaan:

$$\frac{\partial S_p}{\partial t} = \frac{a}{(a + b \cdot t)^2} \quad (14)$$

Ajan hetkellä $t = 0$ saadaan tällöin:

$$\frac{\partial S_p}{\partial t}(t = 0) = \frac{1}{a} = \dot{\delta} \quad (15)$$

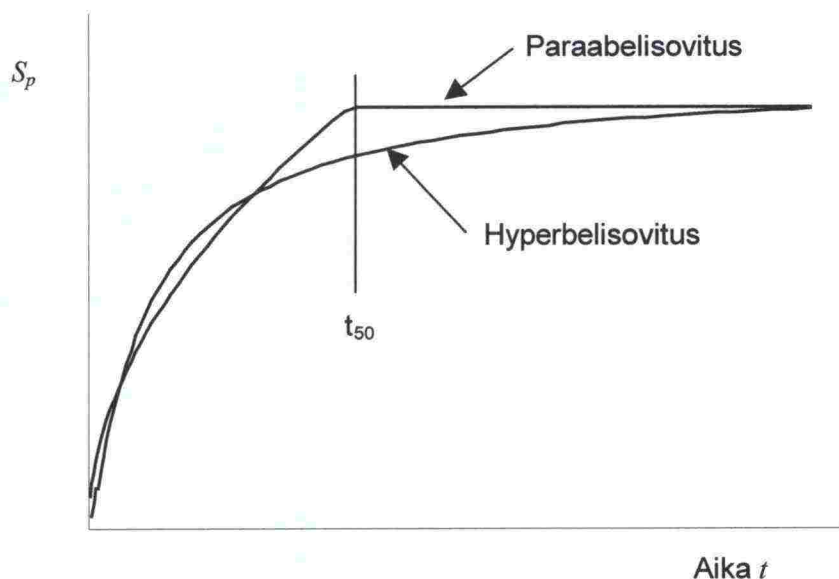
Parametri a :n käänteisluku on näin ollen aika - painumapotentiaalikuvaaajan alkukaltevuus, eli toisin sanoen alkupainumanopeuden käänteisluku. Hyperbelin käyttö on näin ollen mielekäästä, koska sen parametreilla a ja b on selkeä fysikaalinen merkitys:

$$\begin{aligned} a &= \text{alkupainumanopeuden käänteisluku} \\ b &= \text{painumapotentiaalin maksimi-arvon käänteisluku} \end{aligned}$$

Parametrien määrittystä varten yhtälö (12) voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\frac{t}{S_p} = a + b \cdot t \quad (16)$$

mistä nähdään, että piirrettäessä tulokset t/S_p - t koordinaatistoon, saadaan parametri a pystyakselin leikkauspisteestä ja b suoran kaltevuudesta. Periaatekuva hyperbelisovituksen mukaisesta painumapotentiaalin approksimoinnista on esitetty kuvassa 3. Yhtälön (16) mukainen hyperbelin parametrien määrittäminen on esitetty kuvassa 6.



Kuva 3. Paraabeli- ja hyperbelisovitusten periaatekuvat.

2.3.2 Aika-painuman approksimointi

Painumapotentiaalimenetelmässä on yhtälön (7) mukaisesti painumisnopeus yhtä kuin painumapotentiaali jaettuna ajalla. Lauseke painumalle saadaan integroimalla painumanopeus ajan suhteen, eli:

$$\delta = \int S \cdot \frac{1}{t} dt \quad (17)$$

Painumapotentiaalimenetelmä ei ota huomioon alkupainumaa. Tämän vuoksi integrointi on tehtävä ajanhetkestä t_0 eteenpäin, missä t_0 on alkupainuman kuluva aika.

Paraabelisovitus

Sijoittamalla yhtälö (10) yhtälöön (17), ja olettamalla että alkupainuma ajanhetkellä t_0 on yhtä kuin δ_0 , saadaan painumalle muodostettua yhtälö (18).

$$\delta = \begin{cases} \delta_0 + \frac{2 \cdot S_{p0}}{\sqrt{t_{50}}} (\sqrt{t} - \sqrt{t_0}) & t \leq t_{50} \\ \delta_0 + 2 \cdot S_{p0} \left(1 - \frac{\sqrt{t_0}}{\sqrt{t_{50}}}\right) + S_{p0} \ln\left(\frac{t}{t_{50}}\right) & t > t_{50} \end{cases} \quad (18)$$

Hyperbelisovitus

Sijoittamalla yhtälö (12) yhtälöön (17), ja olettamalla että alkupainuma ajanhetkellä t_0 on yhtä kuin δ_0 , saadaan painumalle yhtälö (19).

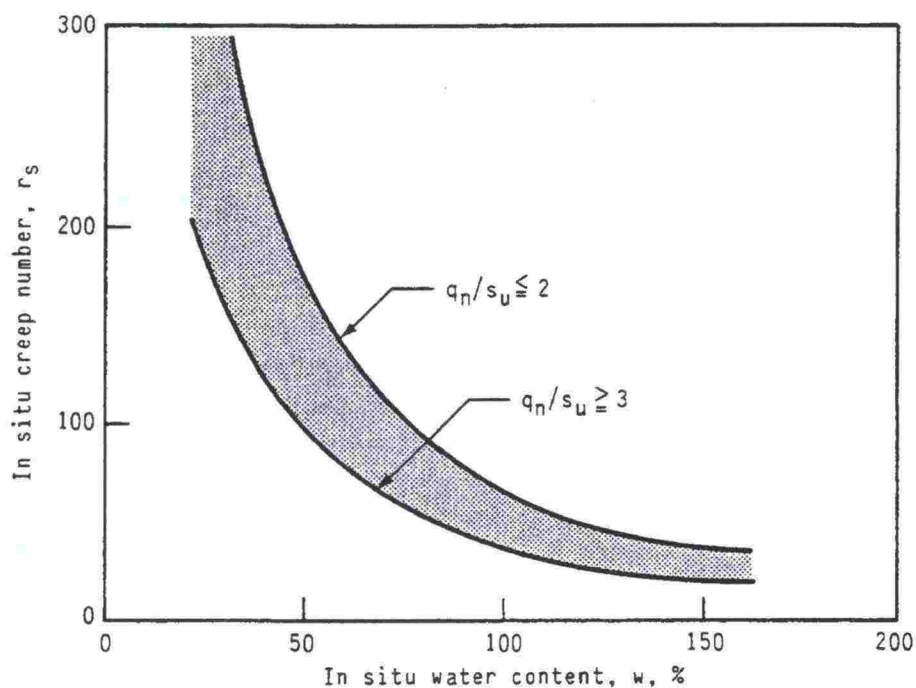
$$\delta = \delta_0 + \frac{1}{b} (\ln(a + b \cdot t) - \ln(a + b \cdot t_0)) \quad (19)$$

2.3.3 Painumaennusteen laatiminen

Painumien arviointi painumapotentialimenetelmän avulla tapahtuu sovittamalla paraabeli- ja hyperbelisovitusten mukaiset painuma- ja painumapotentialikäyrät havaittuihin arvoihin, ja arvioimalla näiden avulla tulevia painumia. Ensimmäisenä tehtävänä on näin ollen painumapotentialin laskeminen mitatuista painumahavainnoista. Painumapotentialin arvo saadaan yhtälön (7) avulla. Se voidaan laskea joko määrittämällä aika-painumakuvaajan tangentti graafisesti tai laskennallisesti suoraan havaintojen pohjalta. On syytä huomata, että mikäli painumisnopeus (aika-painuman tangentti) määritetään laskemalla kahdesta peräkkäisestä mittauksesta tulee aikana t yhtälössä (7) käyttää näiden havaintojen keskimääräistä aikaa, ei viimeisintä mittausaikaa.

Kun havaintoja vastaava painumapotentialikäyrä on saatu määritettyä sovitetaan paraabeli- ja hyperbelisovitusten mukaiset painuma ja painumapotentialikäyrät mitattuja arvoja vastaaviin kuvaajiin parametrejä varioimalla. Mikäli havaintoja on vasta lyhyeltä ajalta voidaan parametrien arvioimiseen käyttää myös muuta tietoa. Kuten kohdassa 2.3.1 todettiin, voidaan painumapotentialin lopullista arvoa arvioida primaaripainuman avulla siten, että $S_{p0} = 1/4 \delta_p$. Lasketun primaaripainuman avulla saadaan siten ensimmäinen approksimaatio painumapotentialin lopulliselle arvolle.

Toinen tapa arvioida painumapotentialin suuruutta on hyödyntää hiipumalukua (tai C_{α} -aa) yhtälön (5) avulla. Hiipumaparametrejä ei kuitenkaan läheskään aina ole määritetty. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että todellinen painumatila ei läheskään aina ole yksiulotteinen, etenkin mikäli varmuusluku on pieni. Koska painumapotentiali kuvaa kokonaispainumaa on ödometrikokeella määritettyjen hiipumaparametrien avulla laskettu painumapotentiali tällöin liian pieni. Janbu on laskenut hiipumalukujen arvoja kenttähavainnoista yhtälön (5) avulla (Janbu 1995, 1998). Kuvassa 4 on Janbun esittämät hiipumaluvun kenttäarvojen vaihteluvälit vesipitoisuuden ja mobilisointuneen lujuuden funktiona. Myös Janbun vertailuissa ovat kenttäarvot olleet yleensä pienempiä kuin ödometrikokeiden arvot.



Kuva 4. 20 Kenttähavainnon perusteella laskettu hiipumaluvun vaihteluväli vesipitoisuuden ja mobilisoituneen lujuuden funktiona (Janbu 1998).

Hyperbelisovituksen parametri a saadaan painumapotentialin käänteislukuna. Paraabelisovituksen käyttämälle aika-arvolle t_{50} saadaan approksimaatio keskimääräisen konsolidaatiokertoimen avulla yhtälöstä (11). Hyperbelisovituksen parametri b , samoin kuin alkupainuma ja siihen kuluva aika saadaan mitatuista arvoista jo hyvin lyhyen havaintoajan jälkeen.

3 MUUT MENETELMÄT

3.1 Johdanto

Painumahavaintojen tuloksia hyödyntämällä voidaan painumalaskentaa tarkistaa usealla eri tavalla. Tässä raportissa käsitellään painumapotentialimenetelmän lisäksi Suomessa hieman yleisemmin käytettyjä Asaokan menetelmää sekä hyperbelimenetelmää.

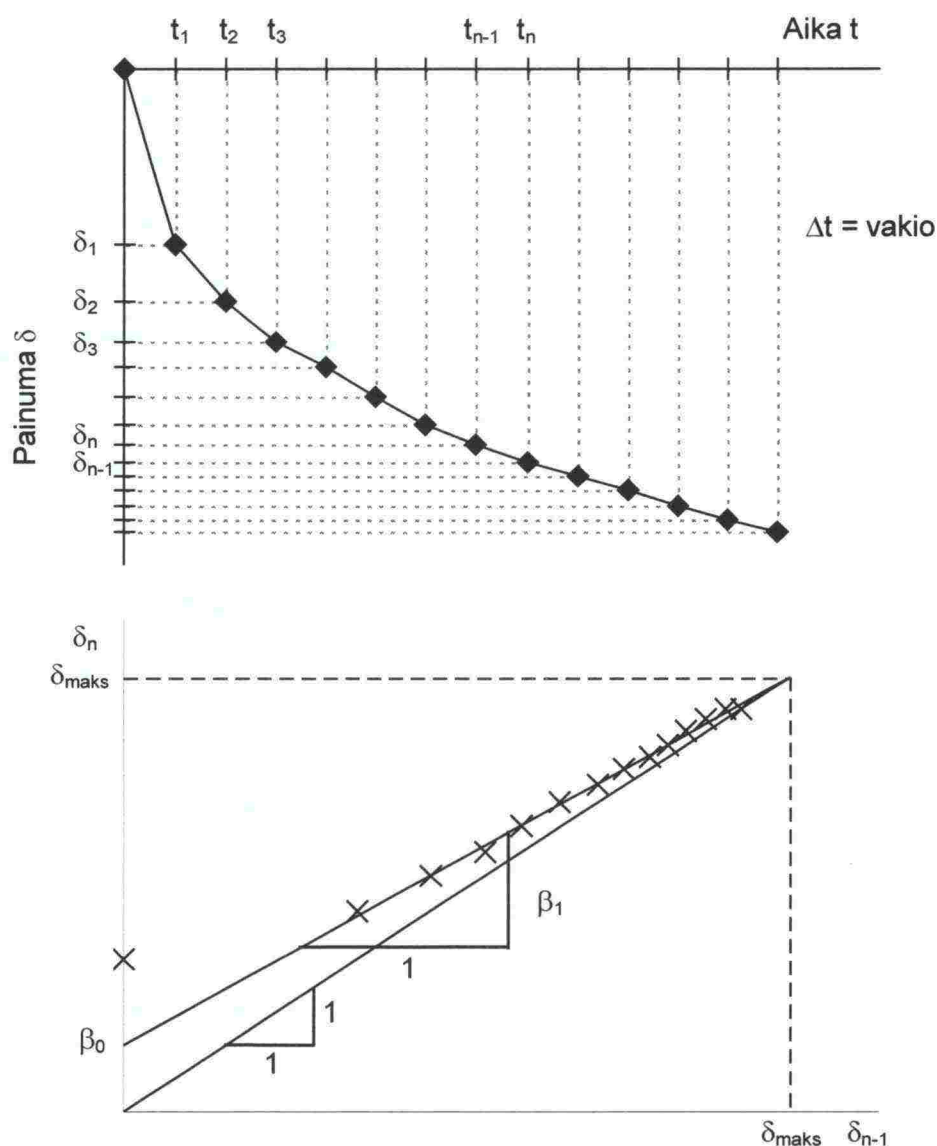
3.2 Asaokan menetelmä

Asaokan menetelmässä (Asaoka 1978) tietyin aika-askelin tapahtuvaa painumaa arvioidaan yhtälön (20) avulla.

$$\delta_n = \beta_0 + \beta_1 \cdot \delta_{n-1} \quad (20)$$

missä δ_n = painuma ajanhetkellä t_n
 δ_{n-1} = painuma ajanhetkellä t_{n-1} , aikaväli $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ vakio
 β_0, β_1 = parametrejä

Yhtälön mukaan painumahavainnot asettuvat suoralle $\delta_n - \delta_{n-1}$ koordinaatistossa. Parametri β_0 saadaan pysty akselin leikkauspisteestä ja β_1 suoran kaltevuudesta, kuva 5.



Kuva 5. Asaoka'n menetelmä.

Primaaripainuman maksimiarvoksi saadaan yhtälöstä (16) ratkaisemalla:

$$\delta_{maks} = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} \quad (21)$$

Menetelmän ongelmana voidaan pitää sitä, että se edellyttää vakio aikaväliä painumahavaintojen välille. Käytännössä mittausvälit eivät yleensä täytä tätä ehtoa, jolloin joudutaan konstruoimaan painuma-arvot vakio aikavälein. Menetelmä olettaa myös, että maakerrokset ovat homogeenisiä ja kuormitus vakio. Menetelmä ei ota huomioon hiipumaa.

Tässä työssä menetelmää käytetään seuraavasti. Ensin konstruoidaan painumahavaintojen perusteella uusi käyrä jossa havainnot ovat halutun pituisin aikavälein. Nämä painuma-arvot määritetään lineaarisesti interpoloimalla

mitatuista arvoista. Tasaista aika-askelta vastaavat painumat piirretään $\delta_n - \delta_{n-1}$ koordinaatistossa ja määritetään parametrit β_0 ja β_1 . Käytännössä valittu aika-askel vaikuttaa tulokseen. Aika-askel määritetään tästä johtuen siten, että parametrien β_0 ja β_1 avulla laskettu aika-painuma vastaa mahdollisimman hyvin mitattua.

3.3 Hyperbelimenetelmä

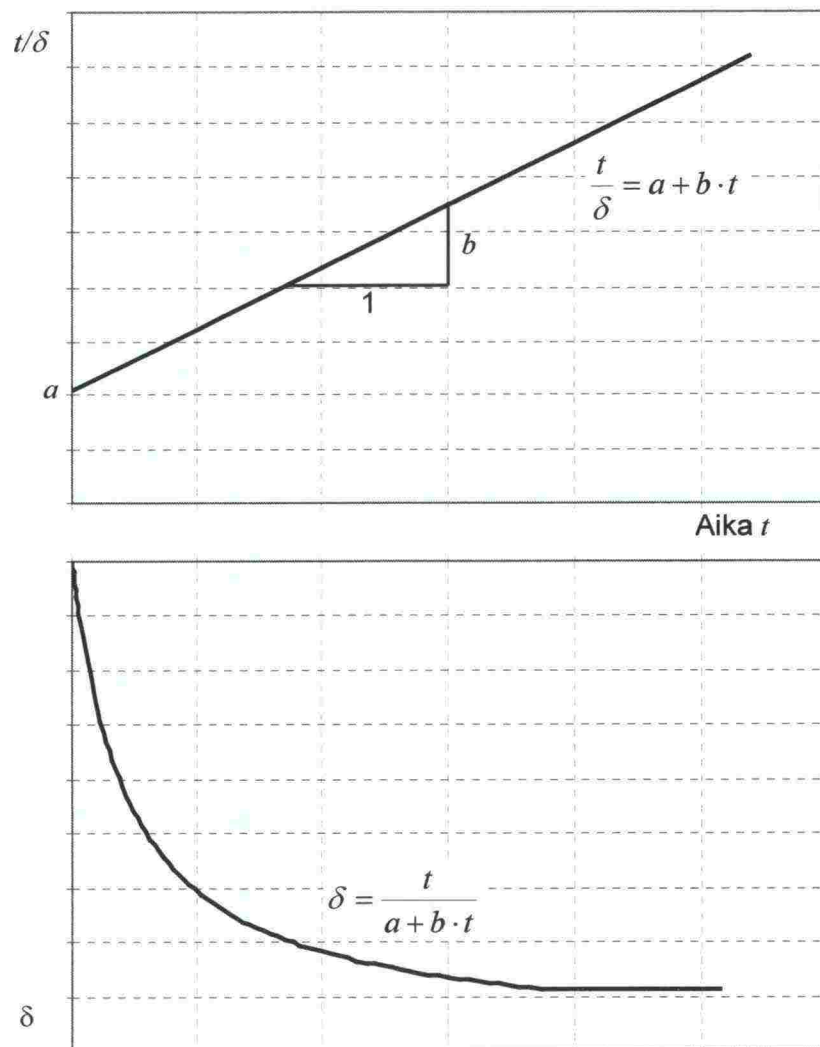
Tässä yhteydessä hyperbelimenetelmällä tarkoitetaan Korhosen (1977) esittämää menetelmää, jossa aika-painumahavaintoja approksimoidaan hyperbelin avulla. Esimerkki menetelmän käytöstä löytyy myös mm. lähteestä RIL (1985). Yhtälön (12) mukaisesti hyperbeli on muotoa:

$$\delta = \frac{t}{a + b \cdot t} \quad (22)$$

Vastaavasti kuten luvussa 2.3.1 esitettiin, voidaan päätellä, että parametrin a :n käänteisluku on nyt painuman aikaderivaatta ajanhetkellä $t = 0$, eli alkupainumanopeus ja parametrin b käänteisluku maksimipainuman käänteisluku. Parametrien määrittystä varten yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\frac{t}{\delta} = a + b \cdot t \quad (23)$$

mistä nähdään, että piirrettäessä tulokset $t/\delta - t$ koordinaatistoon, saadaan parametri a pystyakselin leikkauspisteestä ja b suoran kaltevuudesta, kuva 6.



Kuva 6. Hyperbelimenetelmä.

4 PAINUMA-ARVIOMENETELMIEN TESTAUS

4.1 Yleistä

Tässä luvussa tutkitaan edellisissä luvuissa esitettyjen menetelmien soveltuvuutta aika-painuma arvion tekemiseen tehtyjen painumahavaintojen perusteella. Menetelmien soveltuvuutta tutkitaan eri aikaväleihin tehtyjen painumahavaintojen avulla. Valitut aika-välit ovat soveltuvien osien 6 kk, 1 v, 2 v, 4 v ja 8 v. Kohteiden painumahavainnot jaetaan edellisen mukaisesti aikaväleihin ja aloitetaan painuma-arvion tekeminen pienimmästä havaintoajasta alkaen. Painuma-arvioiden tekemisessä pyritään hyödyntämään soveltuvien osien kaikki tieto mikä on siihen havaintoaikaan asti kertynyt.

4.2 Kohteet

4.2.1 Yleistä

Menetelmien soveltuvuuden arvioimiseen käytetyt Tiehallinnon kohteet on esitetty taulukossa 1 ja Helsingin kaupungin kohteet taulukossa 2.

Seinäjoen koepenkereen osalta esitetään tulokset esimerkinomaisesti kattavasti tekstin yhteydessä. Muilta osin eri ajanjaksoina tehdyt painuma-arviot esitetään pääosin liitteissä.

Taulukko 1. Tiehallinnon kohteet

Kohde	Pisin havaintoaika	Kappale/sivu
Seinäjoen koepenger	7,4	4.2.2 / s. 5
Haarajoen koepenger	3,5 v	4.2.3/ s. 5
Vaasan koepenger	3,5 v	4.2.4/ s.5
Paimion koepenger	3 v (2 v)	4.2.5/ s. 5
Keravan veturitalli	50 v	4.2.6/ s. 5
Naantali – Turku maantie	2 v	4.2.7/ s. 5
Leteensuu	4 v	4.2.8/ s. 5

Taulukko 2. Helsingin kaupungin kohteet.

Kohde	Pisin havaintoaika	Kappale/sivu
Vanhankaupungin lahti	15 v	4.2.9/ s. 5
Itäkeskuksen päiväkot	20 v	4.2.10/ s. 5
Pikku-Huopalahti 1, Tilkan kaava-alue	6,5 v	4.2.11/ s. 5
Pikku-Huopalahti 2, Korppaanmäentie	9 v	4.2.12/ s. 5

4.2.2 Koepenger Seinäjoki, Murro

Seinäjoen koepenger rakennettiin valtatie 18 Vaasa - Jyväskylä geoteknisen suunnittelun yhteydessä. Valtatie kulkee laajan pehmeikköalueen poikki, ja koepenkereen avulla pyrittiin ennakoimaan maanvaraisten tiepenkereiden tulevaa käyttäytymistä. Koepengertä koskevat tiedot on kerätty lähteestä Selkämaa (1994) sekä rakentamisen jälkeisistä mittauksista. Käytössä oleva maksimi havaintoaika on 7,4 vuotta.

Koepenger koostuu maanvaraisesta 2 m korkeasta penkereestä, jonka harjan mitat ovat $10 \times 30 \text{ m}^2$. Penkereen alapuolinen pohjamaa muodostuu 1,5 m paksusta kuivakuorikerroksesta jonka alapuolella on noin 21 m paksu pehmeä maakerros. Maa on liejuista silttiä aina 16 m saakka jonka alapuolella on laihaa savea. Pehmeän savikerroksen vesipitoisuus vaihtelee välillä $w = 46 \dots 83 \%$ ja suljettu leikkauslujuus välillä $s_u = 12 \dots 30 \text{ kPa}$.

Tehdyissä laskelmissa (Selkämaa 1994) käytettyjä konsolidaatiokertoimia vastaava keskimääräisen konsolidaatiokertoimen arvo on noin $c_v = 1,5 \text{ m}^2/\text{a}$. Kuivatus oli konsolidaatiolaskuissa oletettu yksipuoleiseksi. JännitysekspONENTTIA $\beta = 0$ vastaava moduuliluku on käytettyjen arvojen perusteella noin $m = 7$. Penkereen lyhyen ajan varmuusluku on noin 1,4 ja penkereen kokonaispainumaksi on penkereen keskellä laskettu 657 mm.

Näiden tietojen pohjalta voidaan painumapotentialimenetelmän parametrejä arvioida alustavasti seuraavasti.

$$S_{p0} = 1/4 \delta_p = 1/4 * 657 \text{ mm} = 164 \text{ mm} \text{ (vain primaaripainuma)}.$$

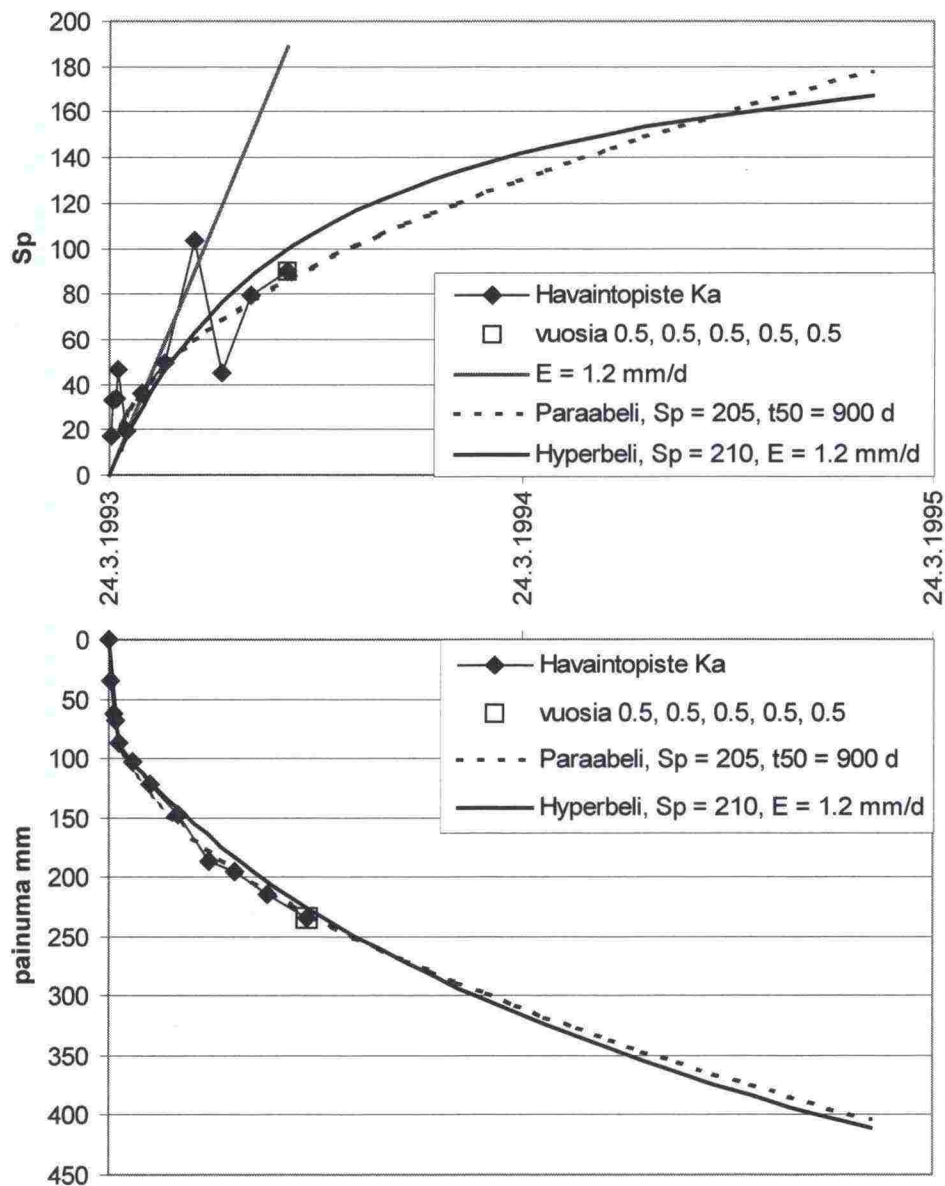
Keskimääräinen vesipitoisuus on noin $w = 65 \%$, mistä kuvan 4 avulla saadaan hiipumaluvuksi $r_s = 76 - 133$, ja edelleen painumapotentialiksi $S_{p0} = 21\text{m}/r_s$, mistä $S_p = 158 \dots 276 \text{ mm}$. Moduuliluvun avulla, ja olettaen, että muodonmuutosnopeusparametri $B = 0,07$ (liejuinen siltti) saadaan hiipumaluvuksi $r_s = 7/B = 100$, mistä $S_p = 210 \text{ mm}$.

Edellisten perusteella arvioidaan, että painumapotentialin lopullinen arvo on noin $S_p = 200 \dots 210 \text{ mm}$.

Ajaksi t_{50} saadaan käyttämällä konsolidaatiokerrointa $c_v = 1,5 \text{ m}^2/\text{a}$ yhtä kuin $t_{50} = 26,8$ vuotta (yksipuolinen kuivatus) tai $t_{50} = 14,4$ vuotta (kaksipuolinen kuivatus).

Havaintoaika 6 kk

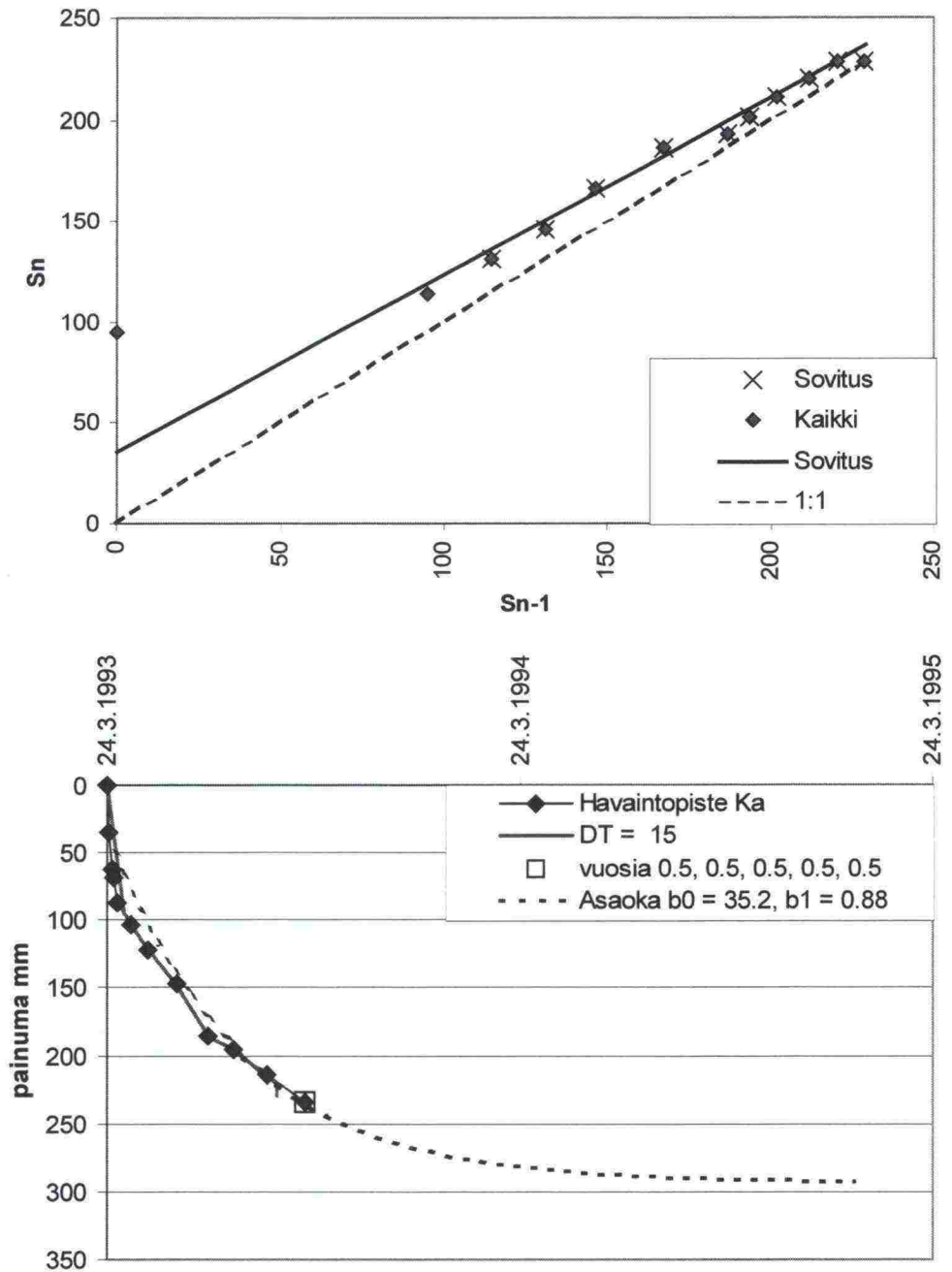
Kuuden kuukauden painumahavainnoista laaditut painuma-arviot on esitetty kuvissa 7 – 9. Painumapotentialimenetelmän mukainen painuma-arvio 6 kk tuloksista määritetyillä parametreillä on 7,4 vuoden kuluttua on 684 mm paraabelisovituksella ja 667 mm hyperbelisovituksella, mitattu arvo 663 mm.



Kuva 7. Murron koepenger. Painumapotentialimenetelmän mukainen painuma-arvio 6 kk painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 684 mm paraabelisovituksella ja 667 mm hyperbelisovituksella, mitattu arvo 663 mm.

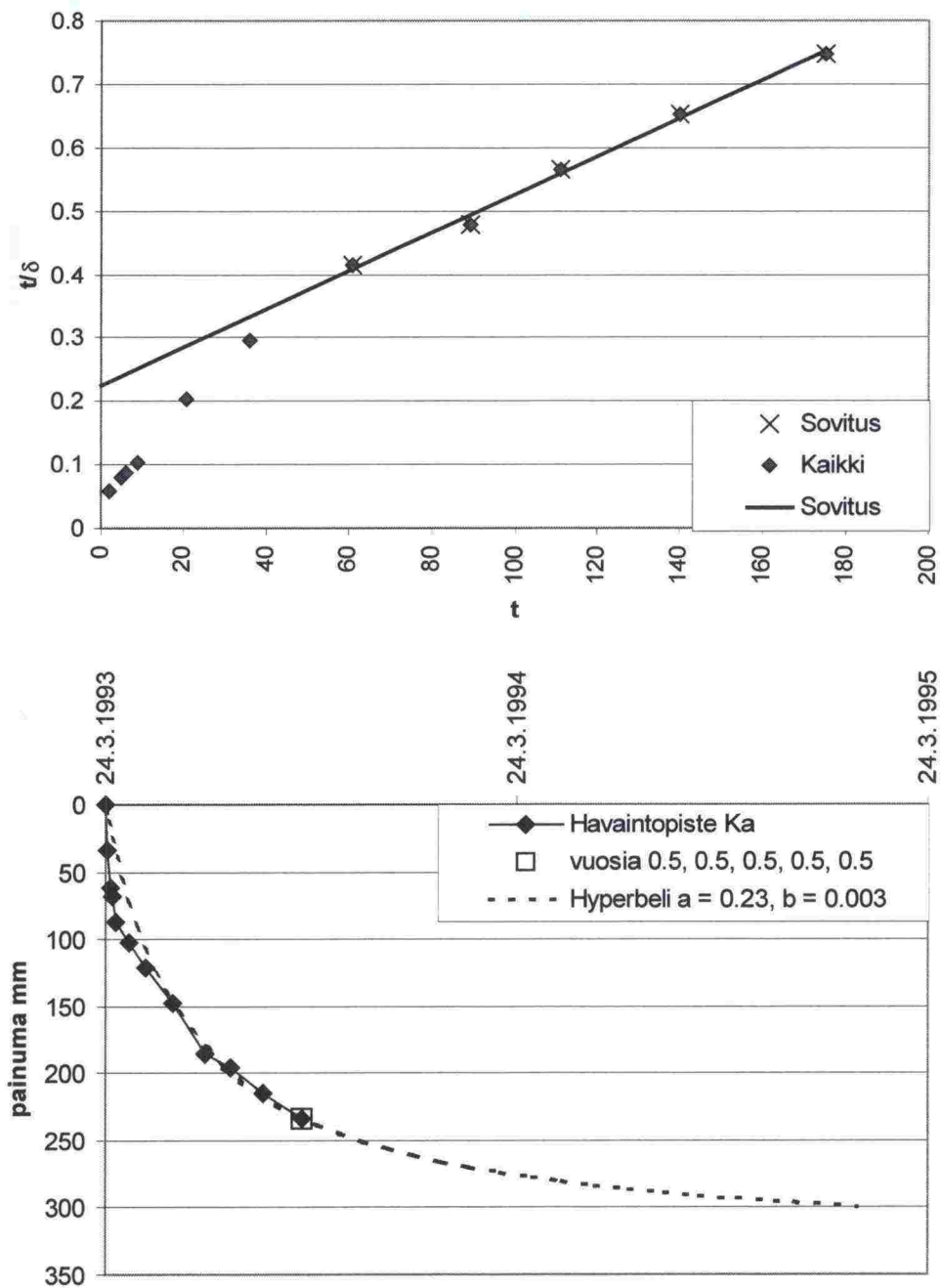
Painumapotentialimenetelmän paraabelisovituksessa käytetty aika-arvo t_{50} poikkeaa huomattavasti konsolidaatiokertoimen perusteella lasketusta arvosta. Käytetty arvo määritettiin sovittamalla paraabelisovituksen mukaiset käyrät havaintoarvoihin. Käytetyn arvon perusteella keskimääräinen konsolidaatiokertoimen arvo on yksipuolisen kuivatuksen tapauksessa yli kymmenkertainen laskennassa käytettyihin arvoihin. Tämä pitää hyvin yhtä Selkämaan havaintojen kanssa. Selkäämaa totesi, että paraabelijakaumalla tarvittaisiin noin 15 kertaisia konsolidaatiokertoimen arvoja ödometrikokeiden tuloksiin nähden, jotta aika-painumalaskenta vastaisi mitattua.

Asaakan menetelmän mukainen sovitus on esitetty kuvassa 8. Menetelmän mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 294 mm kun mitattu arvo on 663 mm.



Kuva 8. Murron koepenger. Asaakan menetelmän mukainen painuma-arvio 6 kk painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 294 mm, mitattu arvo 663 mm.

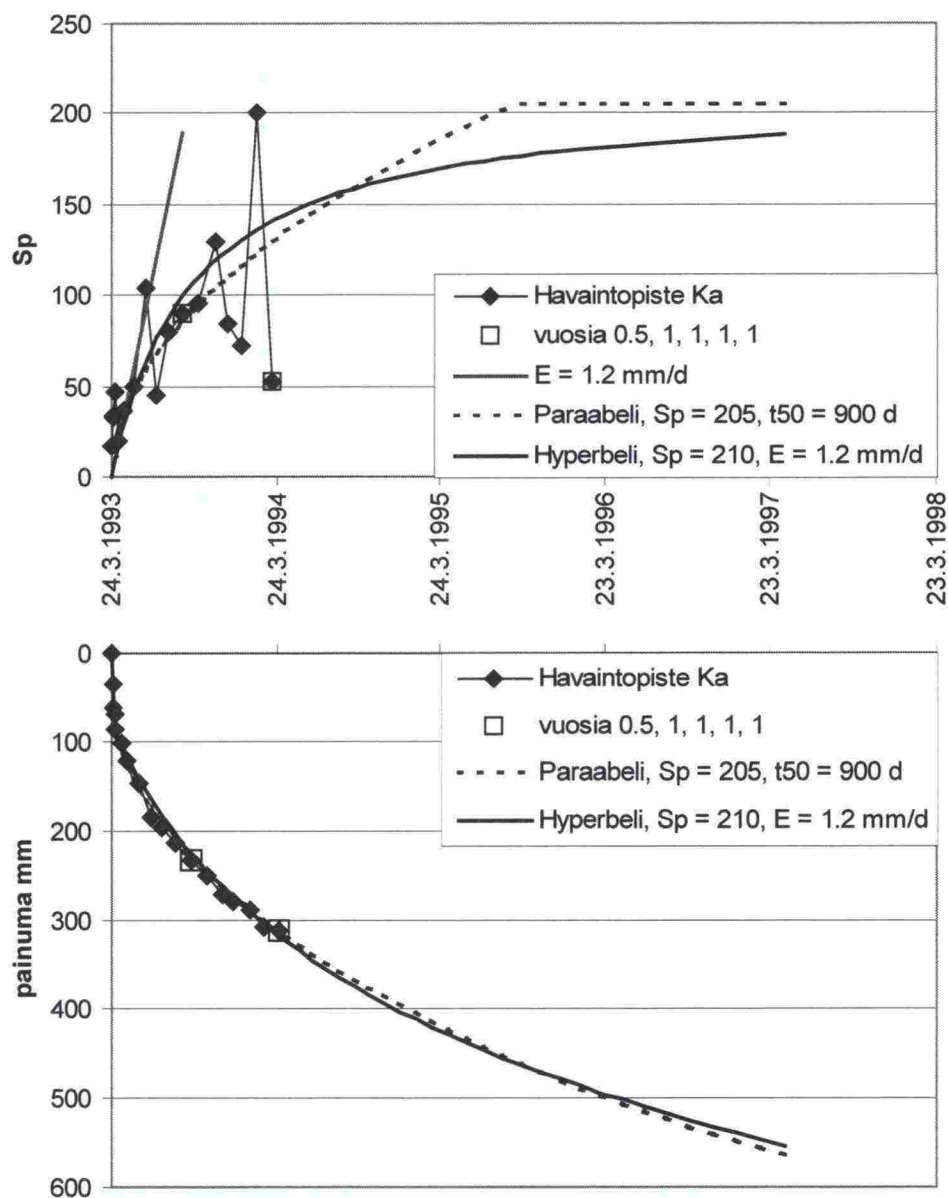
Hyperbelimenetelmän mukainen sovitus on esitetty kuvassa 9. Koska havainnot eivät asetu suoralle $t/\delta - t$ koordinaatistossa, on sovituksessa painotettu loppupään havaintoarvoja. Menetelmän mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 324 mm kun mitattu arvo on 663 mm.



Kuva 9. Murron koepenger. Hyperbelimenetelmän mukainen painuma-arvio 6 kk painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 324 mm, mitattu arvo 663 mm.

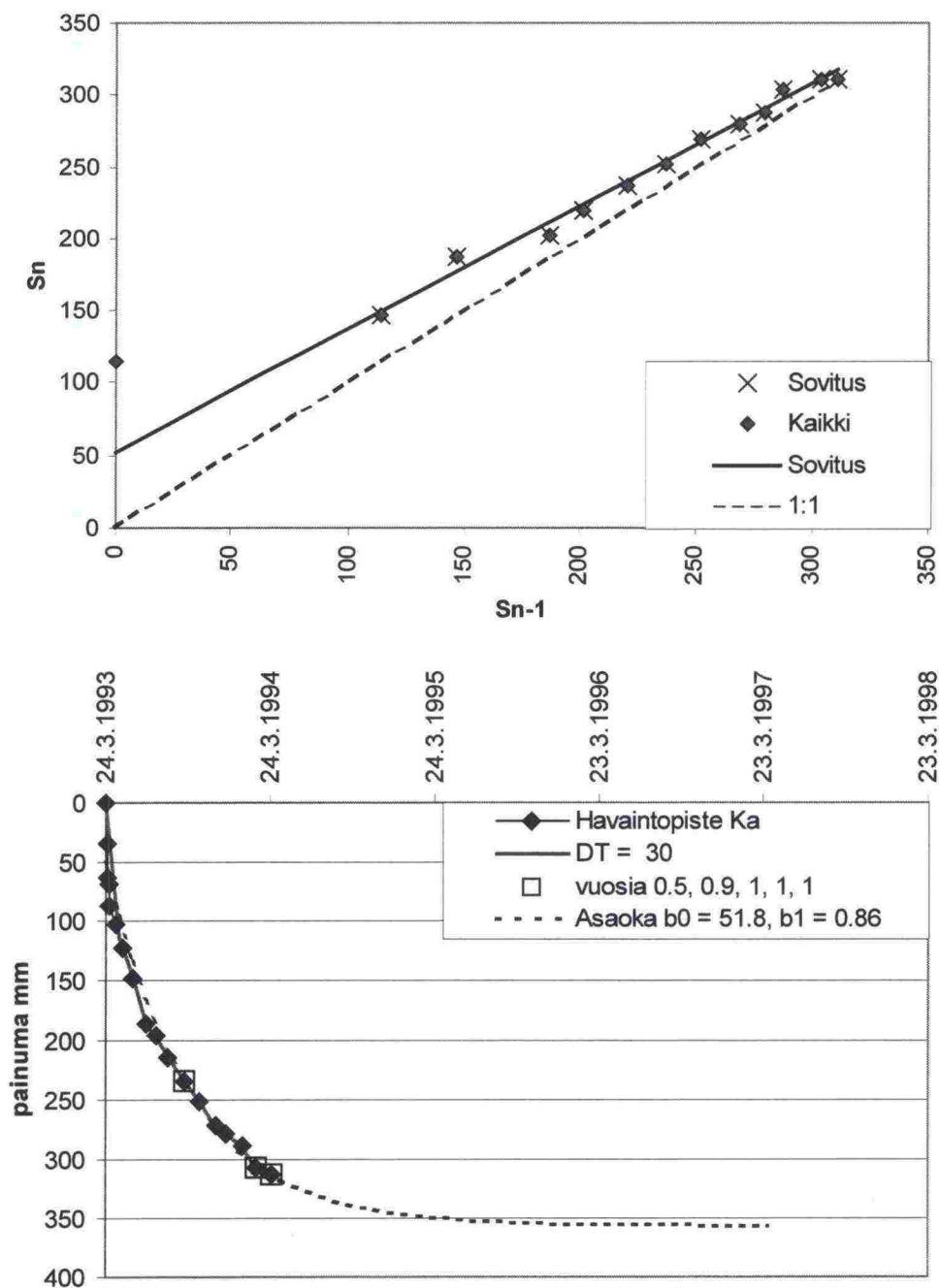
Havaintoaika 1 v

Yhden vuoden painumahavainnoista laaditut painuma-arviot on esitetty kuvissa 10 - 12. Painumapotentialimenetelmän mukaisessa arviossa (kuva 10) uudet havainnot eivät antaneet aihetta muuttaa sovitusta. 7,4 vuoden painuma-arvio on siis edelleen 684 mm paraabelisovituksella ja 667 mm hyperbelisovituksella, mitattu arvo 663 mm.



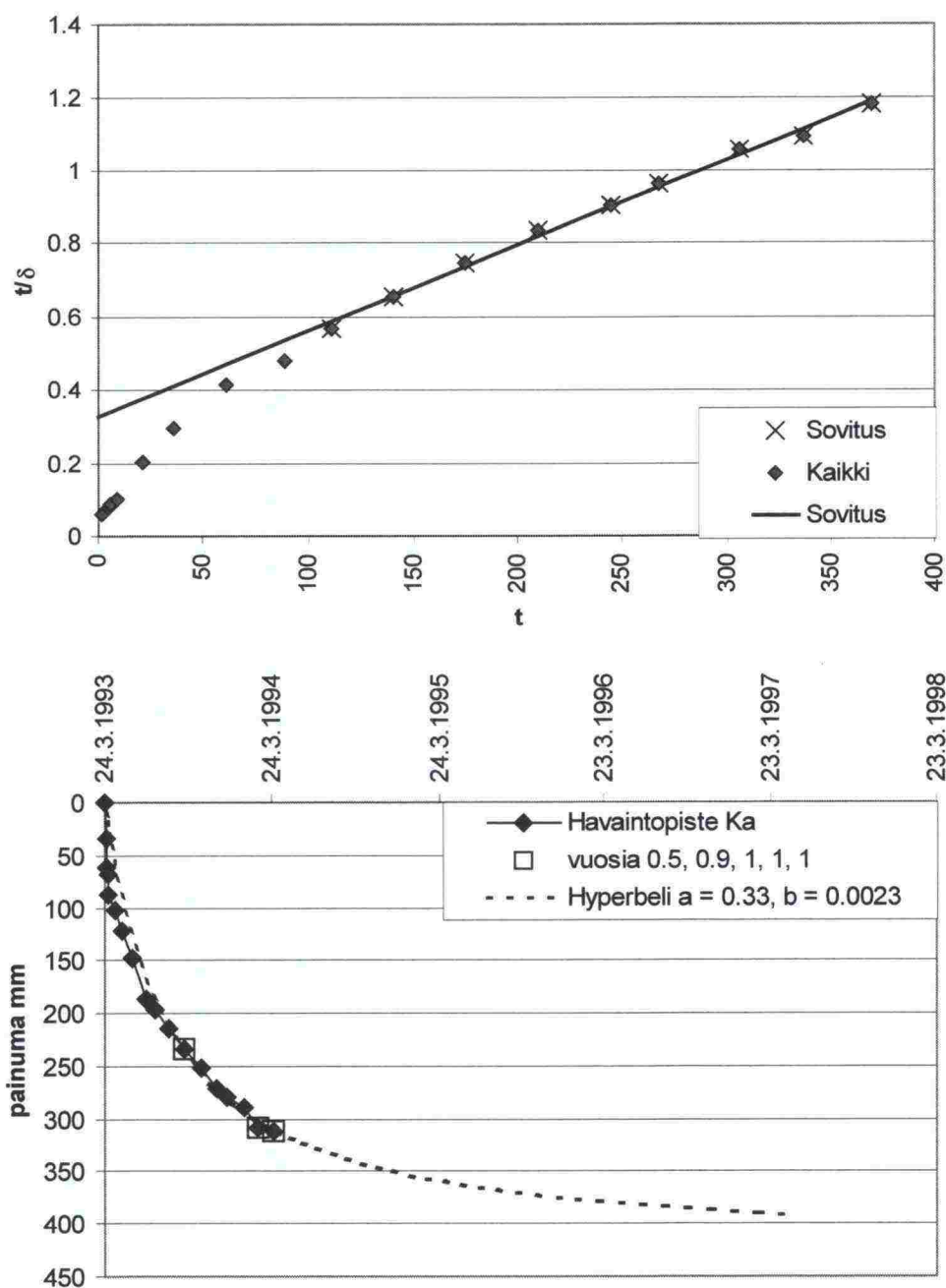
Kuva 10. Murren koepenger. Painumapotentialimenetelmän mukainen painuma-arvio yhden vuoden painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 684 mm paraabelisovituksella ja 667 mm hyperbelisovituksella, mitattu arvo 663 mm.

Asaakan menetelmän mukainen sovitus on esitetty kuvassa 11. Menetelmän mukainen sovitus on muuttunut selvästi edellisestä. Painuma-arvio 7,4 vuoden kuluttua on nyt 357 mm, kun se 6 kk havaintojen perusteella oli 294 mm. Mitattu arvo on 663 mm.



Kuva 11. Murron koepenger. Asaakan menetelmän mukainen painuma-arvio yhden vuoden painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 357 mm, mitattu arvo 663 mm.

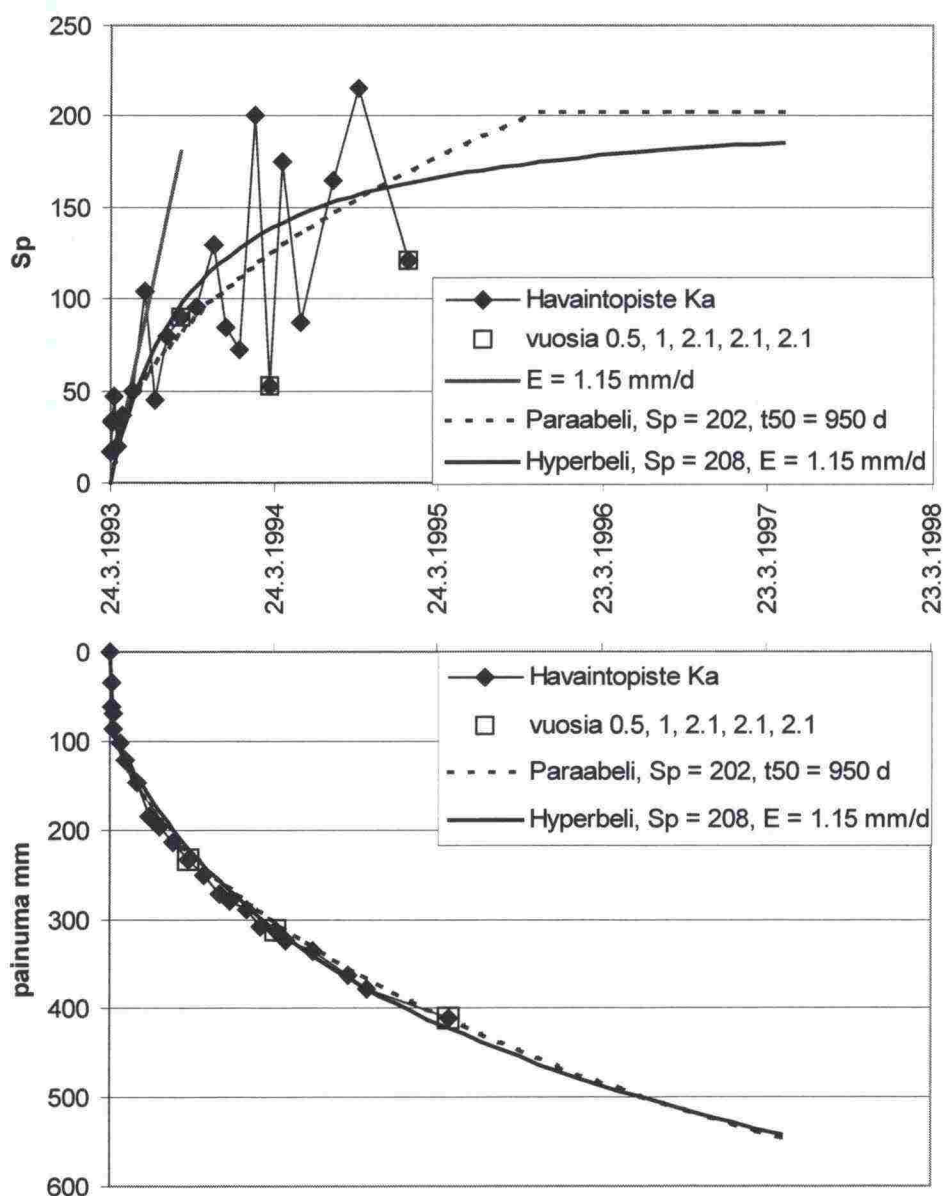
Hyperbelimenetelmän mukainen sovitus on esitetty kuvassa 12. Sovituksessa on jälleen jouduttu painottamaan loppupään havaintoarvoja, jolloin sovitus myös poikkeaa edellisestä. Menetelmän mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 407 mm kun se 6 kk havaintojen perusteella oli 324 mm. Mitattu arvo on 663 mm.



Kuva 12. Murron koepenger. Hyperbelimenetelmän mukainen painuma-arvio yhden vuoden painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 407 mm, mitattu arvo 663 mm.

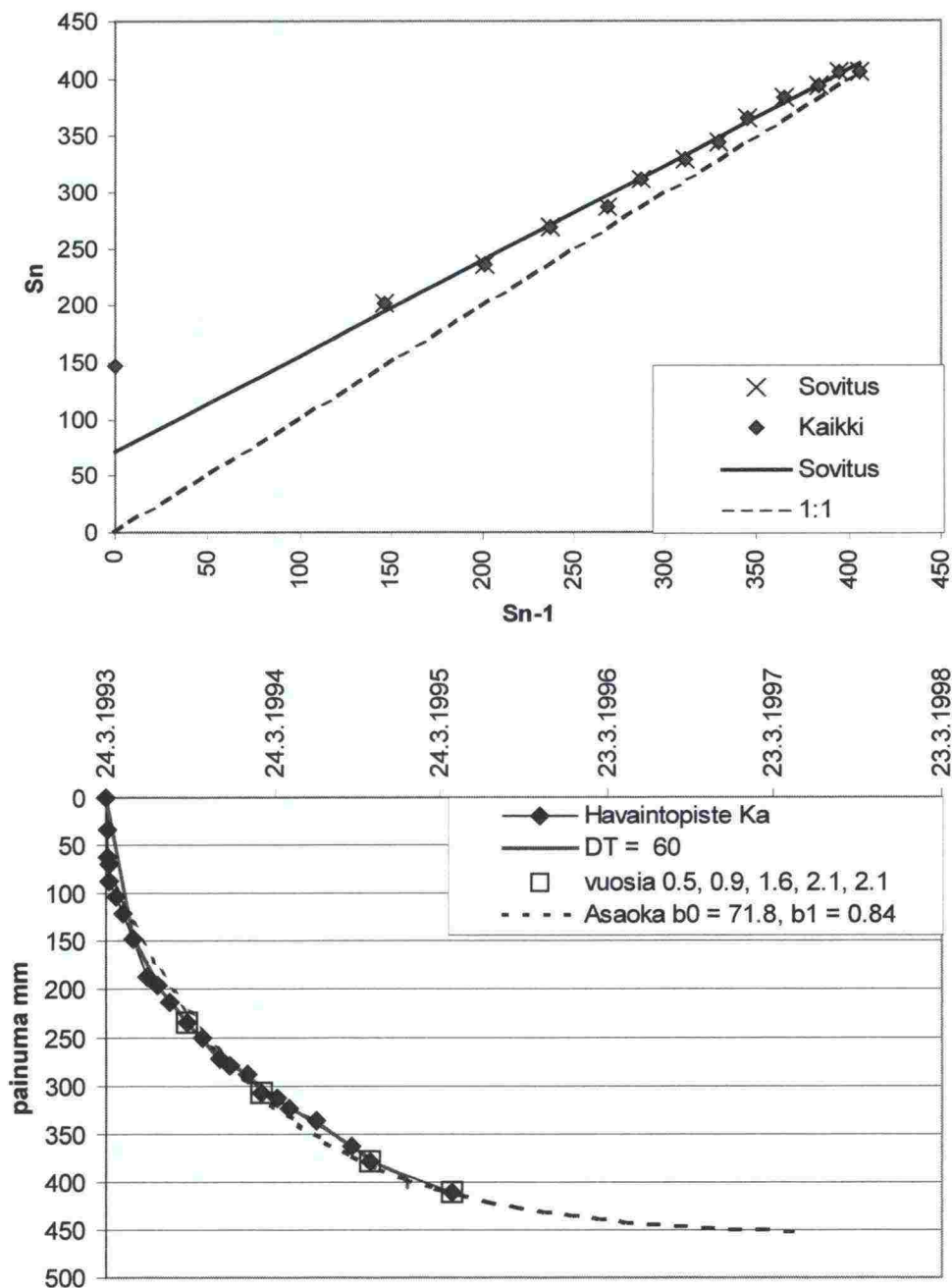
Havaintoaika 2 v

Kahden vuoden painumahavainnoista laaditut painuma-arviot on esitetty kuvissa 13 - 15. Painumapotentialimenetelmän mukaisessa arviossa (kuva 13) on parametrejä hieman muutettu uusien havaintojen pohjalta. 7,4 vuoden painuma-arvio on nyt 666 mm paraabelisovituksella (aikaisemmin 684 mm) ja 656 mm hyperbelisovituksella (aikaisemmin 667 mm). Mitattu arvo on 663 mm.



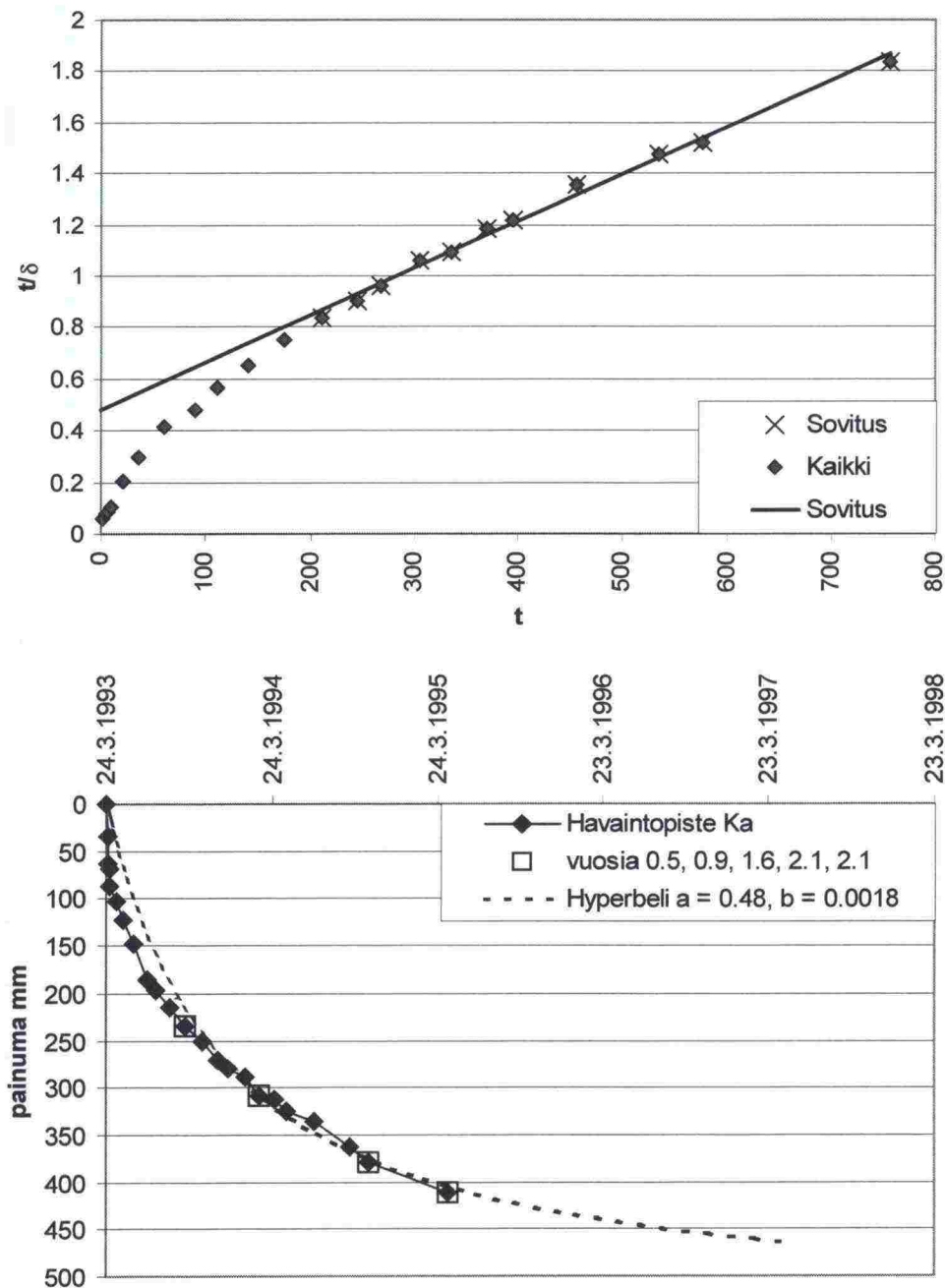
Kuva 13. Murron koepenger. Painumapotentialimenetelmän mukainen painuma-arvio kahden vuoden painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 666 mm paraabelisovituksella ja 656 mm hyperbelisovituksella, mitattu arvo 663 mm.

Asaokan menetelmän mukainen sovitus on esitetty kuvassa 14. Menetelmän mukainen sovitus on jälleen muuttunut selvästi edellisistä. Painuma-arvio 7,4 vuoden kuluttua on nyt 457 mm, kun se aikaisemmin oli 294 mm ja 357 mm. Mitattu arvo on 663 mm.



Kuva 14. Murren koepenger. Asaokan menetelmän mukainen painuma-arvio kahden vuoden painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 457 mm, mitattu arvo 663 mm.

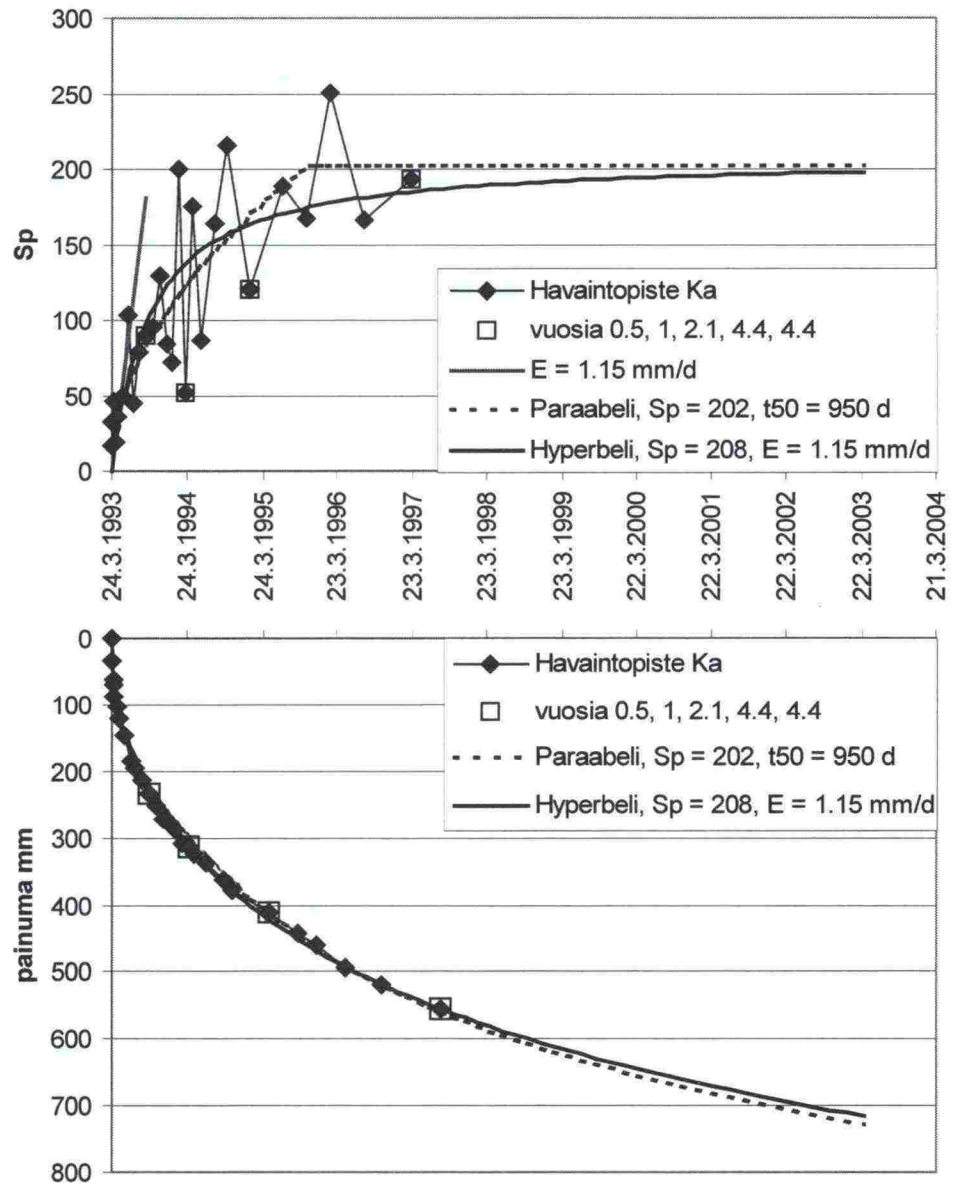
Hyperbelimenetelmän mukainen sovitus on esitetty kuvassa 15. Parametrien arvot ovat jälleen muuttuneet kun uudet havainnot eivät asetu samalle suoralle $t/\delta - t$ koordinaatistossa kun aikaisemmat. Painuma-arvio 7,4 vuoden kuluttua on nyt 497 mm, kun se aikaisemmin oli 324 mm ja 407 mm. Mitattu arvo on 663 mm.



Kuva 15. Murron koepenger. Hyperbelimenetelmän mukainen painuma-arvio kahden vuoden painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 497 mm, mitattu arvo 663 mm.

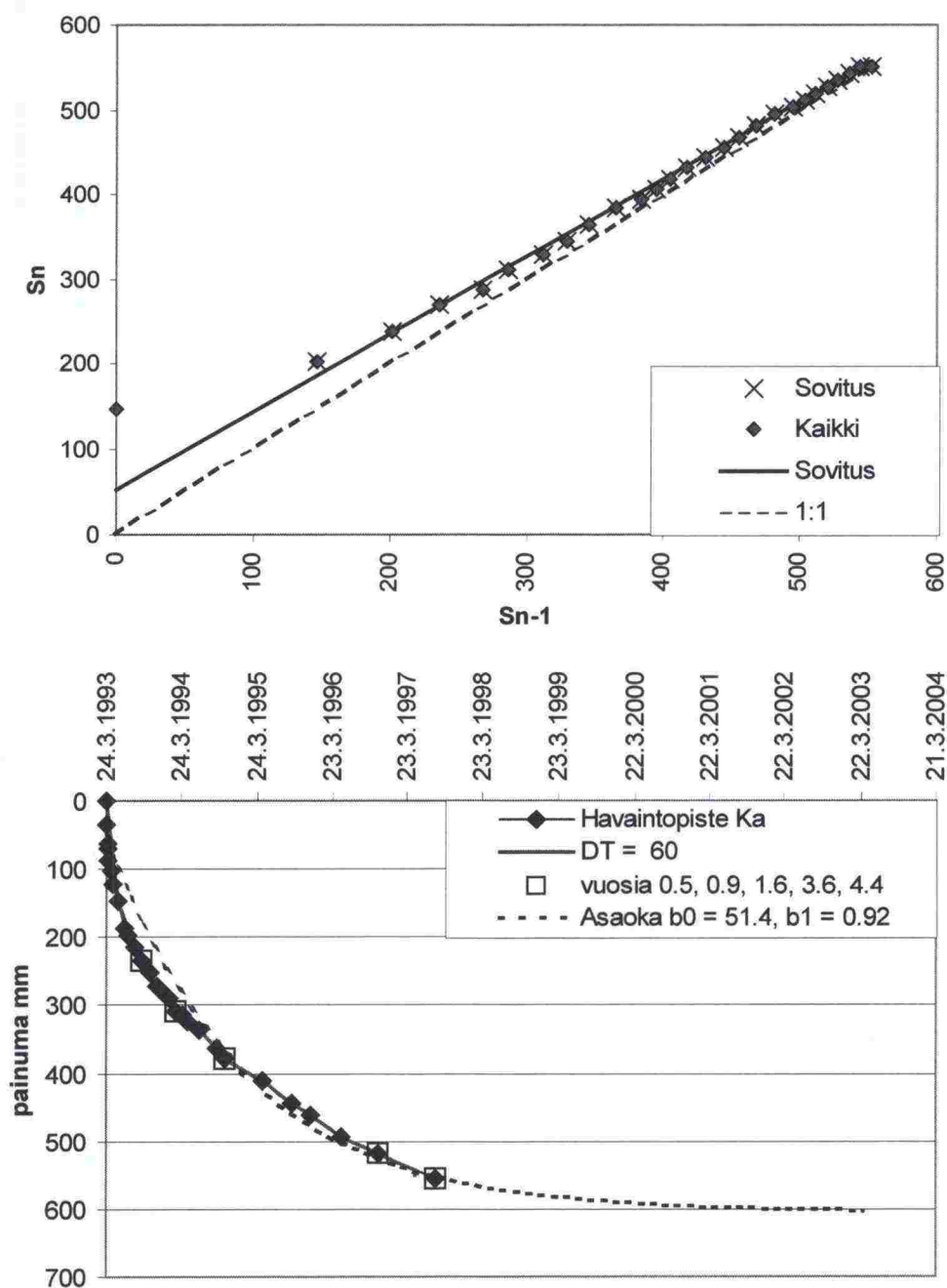
Havaintoaika 4 v

Neljän vuoden painumahavainnoista laaditut painuma-arviot on esitetty kuvissa 16 - 18. Painumapotentialimenetelmän mukaisessa arviossa (kuva 16) uudet havainnot eivät antaneet aihetta muuttaa edellistä sovitusta. 7,4 vuoden painuma-arvio on siis edelleen 666 mm paraabelisovituksella ja 656 mm hyperbelisovituksella, mitattu arvo 663 mm.



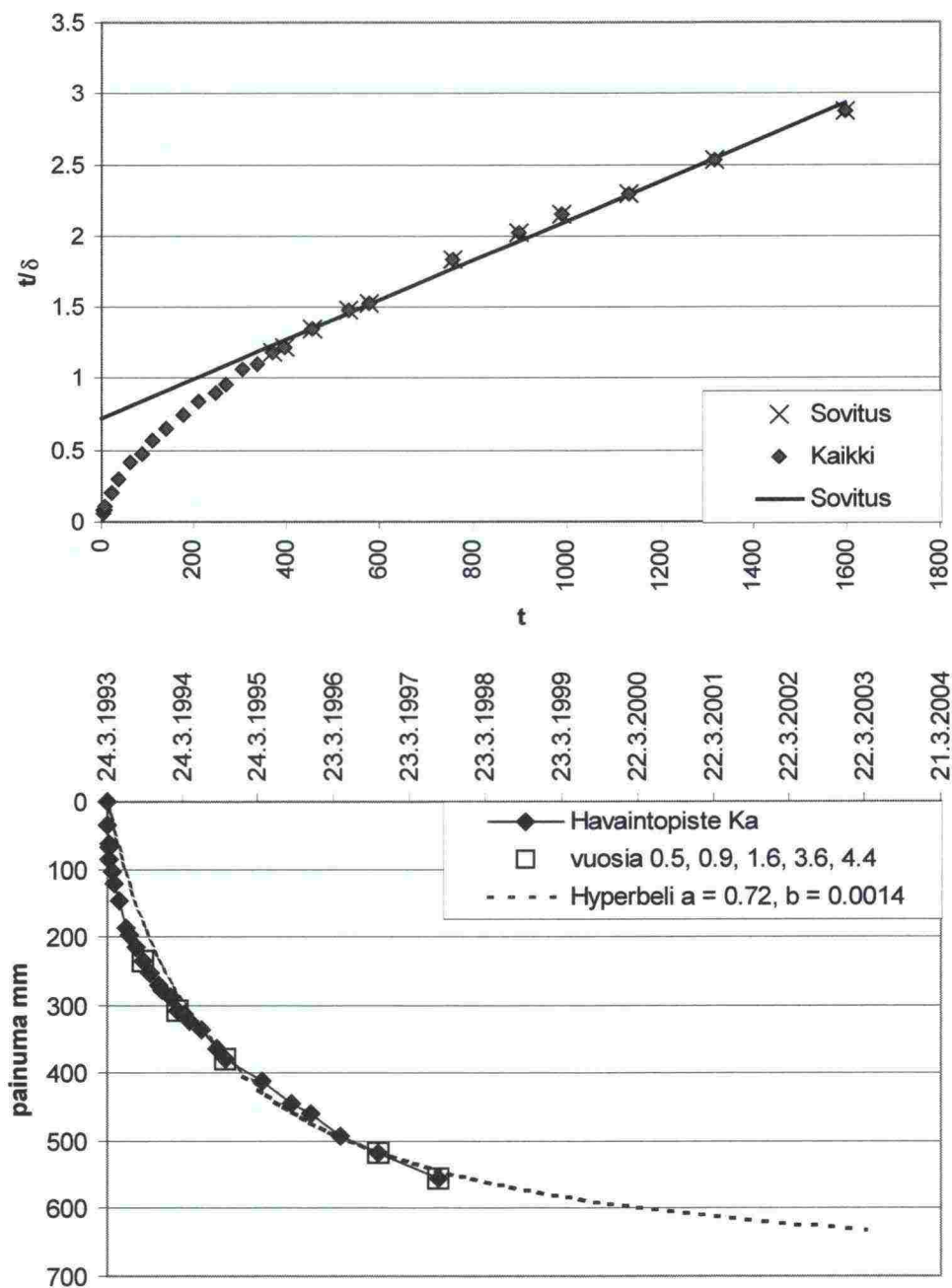
Kuva 16. Murron koepenger. Painumapotentialimenetelmän mukainen painuma-arvio neljän vuoden painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 666 mm paraabelisovituksella ja 656 mm hyperbelisovituksella, mitattu arvo 663 mm.

Asaakan menetelmän mukainen sovitus on esitetty kuvassa 17. Menetelmän mukainen sovitus on jälleen muuttunut selvästi edellisistä. Painuma-arvio 7,4 vuoden kuluttua on nyt 594 mm, kun se aikaisemmin oli 294 mm, 357 mm ja 457 mm. Mitattu arvo on 663 mm.



Kuva 17. Murren koepenger. Asaakan menetelmän mukainen painuma-arvio neljän vuoden painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 594 mm, mitattu arvo 663 mm.

Hyperbelimenetelmän mukainen sovitus on esitetty kuvassa 18. Parametrien arvot ovat jälleen muuttuneet kun uudet havainnot eivät asetu täsmälleen samalle suoralle $t/\delta - t$ koordinaatistossa kun aikaisemmat. Parametrien arvot riippuvat myös mistä ajankohdasta lähtien suora sovitetaan dataan. Kuvan sovituksessa on käytetty 1 vuoden jälkeisiä havaintoja, kun edellisessä sovituksessa käytettiin 0,5 vuoden jälkeisiä havaintoja.

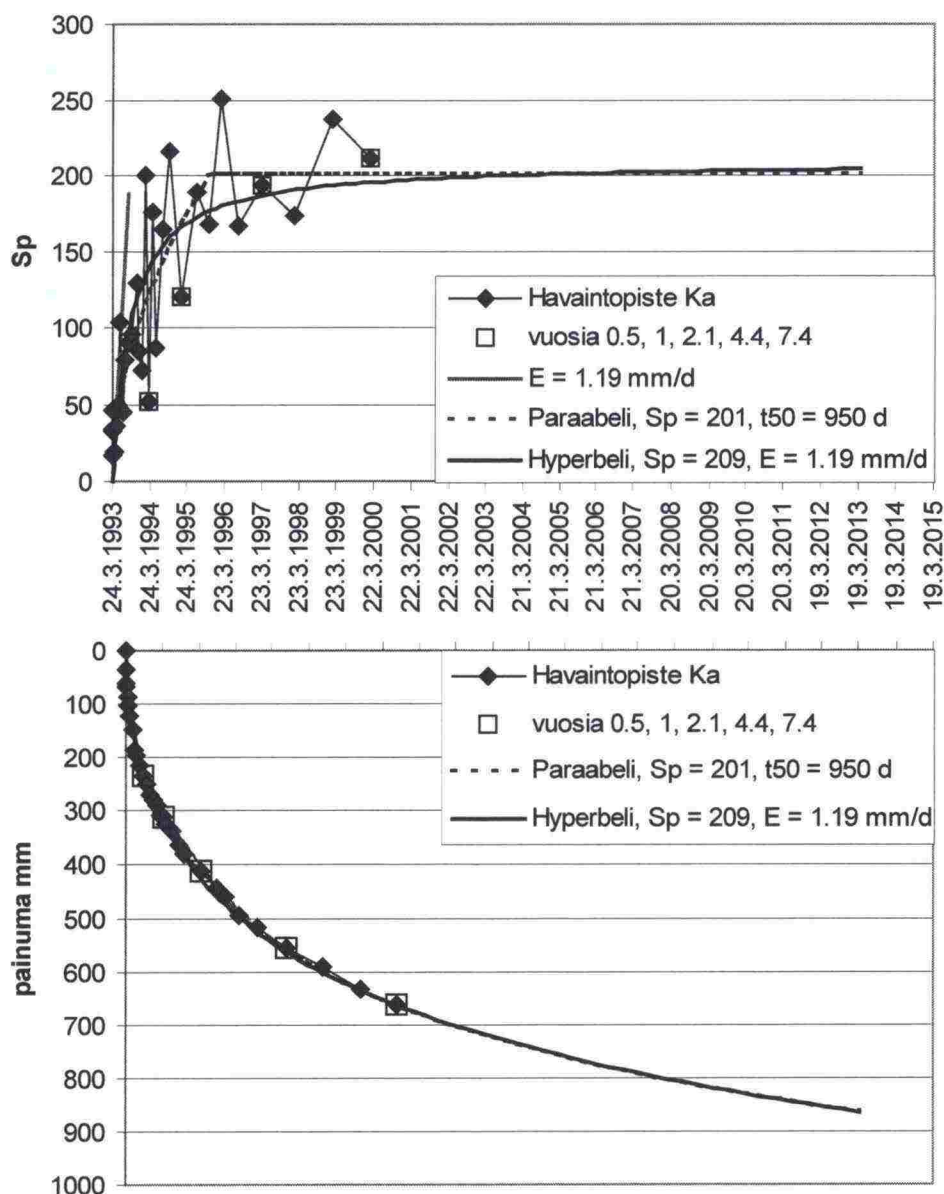


Kuva 18. Murron koepenger. Hyperbelimenetelmän mukainen painuma-arvio neljän vuoden painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 7,4 vuoden kuluttua on 605 mm, mitattu arvo 663 mm.

Painuma-arvio 7,4 vuoden kuluttua on nyt 605 mm, kun se aikaisemmin oli 324 mm, 407 mm ja 497. Mitattu arvo on 663 mm.

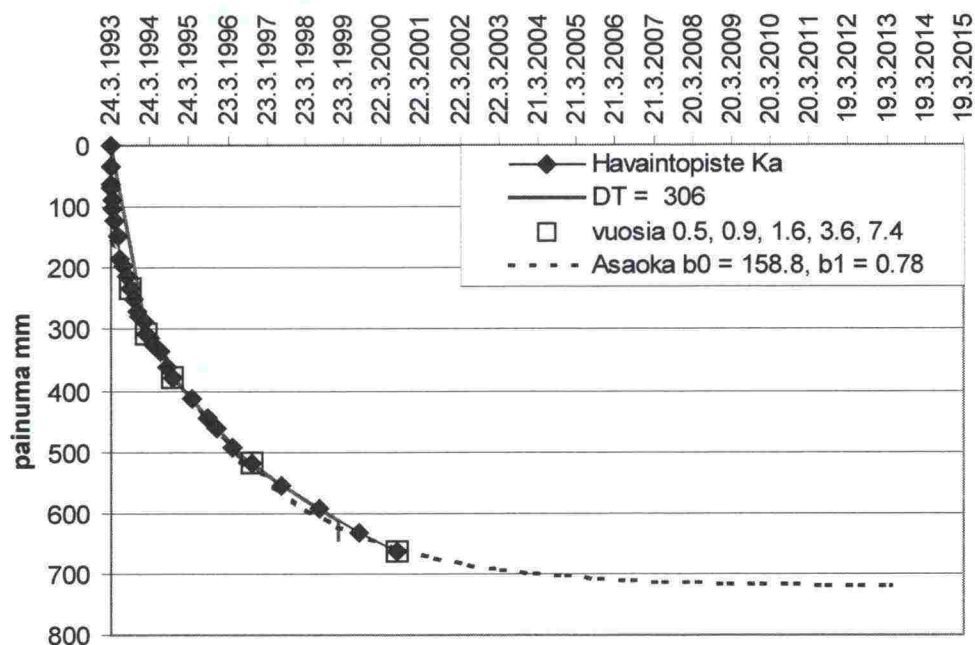
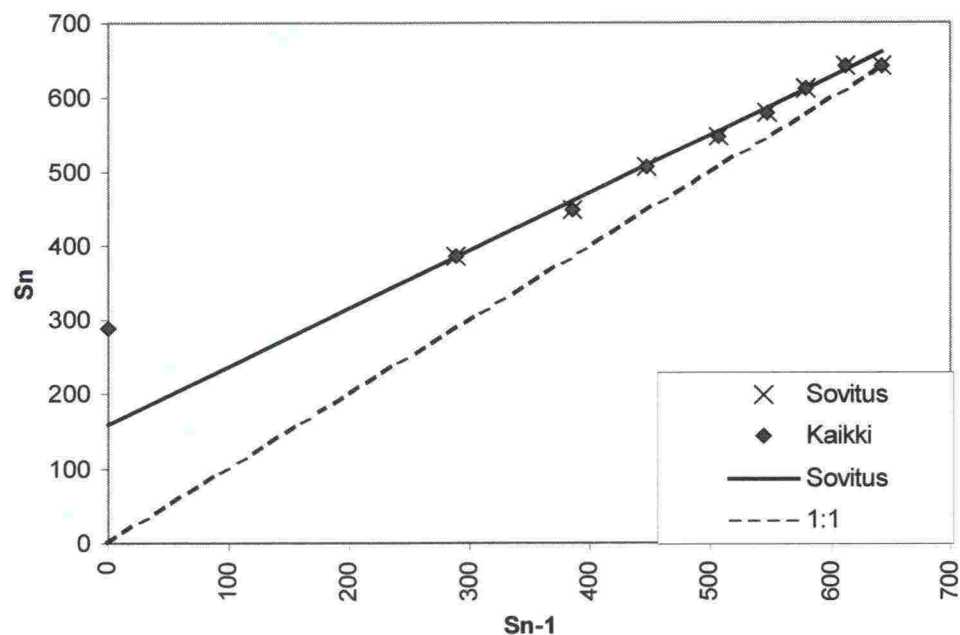
Havaintoaika 7,4 v

Pisin käytössä oleva havaintoaika Seinäjoen koepenkereestä oli 7,4 vuotta. Tätä vastaavat painuma-arviot on esitetty kuvissa 19 –21. Painumia on nyt pyritty ennustamaan 20 v päähän penkereen rakentamisesta.



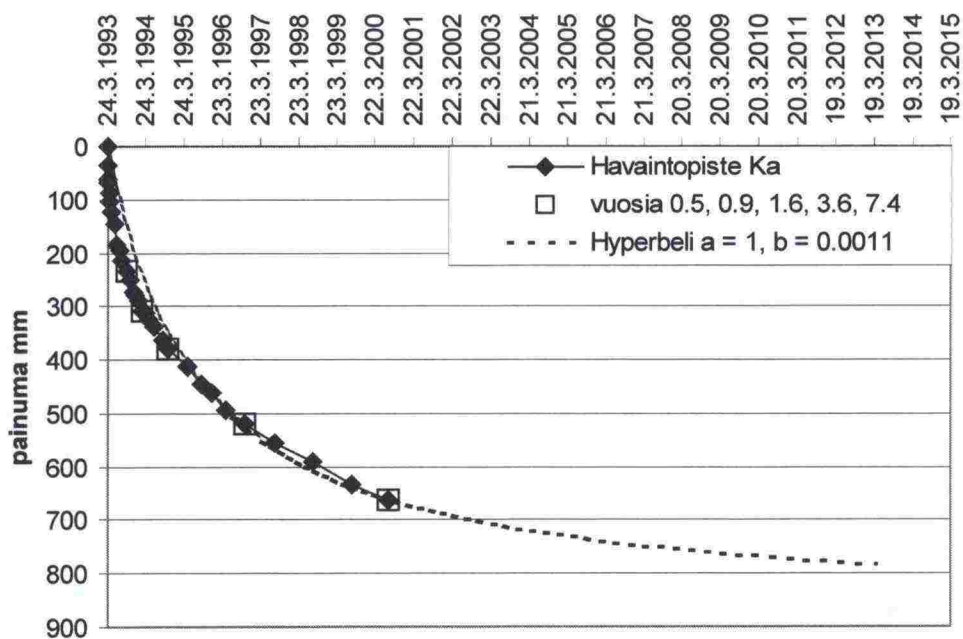
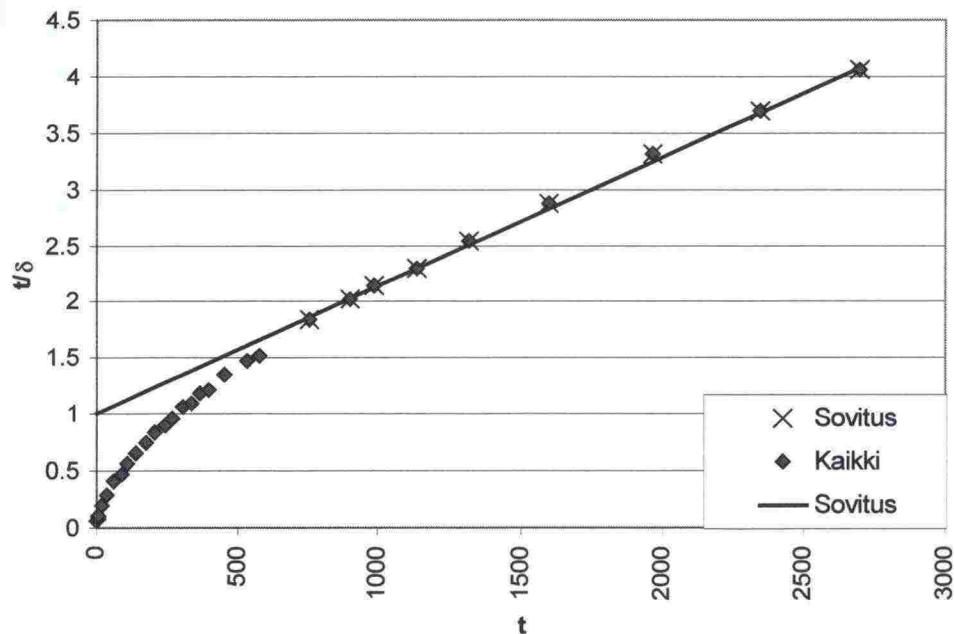
Kuva 19. Murron koepenger. Painumapotentialimenetelmän mukainen painuma-arvio 7,4 vuoden painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 20 vuoden kuluttua on 863 mm paraabelisovituksella ja 864 mm hyperbelisovituksella.

Painumapotentiaalimenetelmän mukaisessa arviossa (kuva 19) uudet havainnot muuttivat vain hyvin vähän edellistä sovitusta. Painuma-arvio 20 vuoden kuluttua on 863 mm paraabelisovituksella ja 864 mm hyperbelisovituksella. Neljän vuoden havaintojen perusteella arvot olisivat 867 mm ja 854 mm.



Kuva 20. Murron koepenger. Asaokan menetelmän mukainen painuma-arvio 7,4 vuoden painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 20 vuoden kuluttua 720 mm.

Asaakan menetelmän mukainen sovitus on esitetty kuvassa 20. Menetelmän mukainen sovitus on jälleen muuttunut selvästi edellisistä. Painuma-arvio 20 vuoden kuluttua on 720 mm. Edellisillä parametreillä se olisi 604 mm.

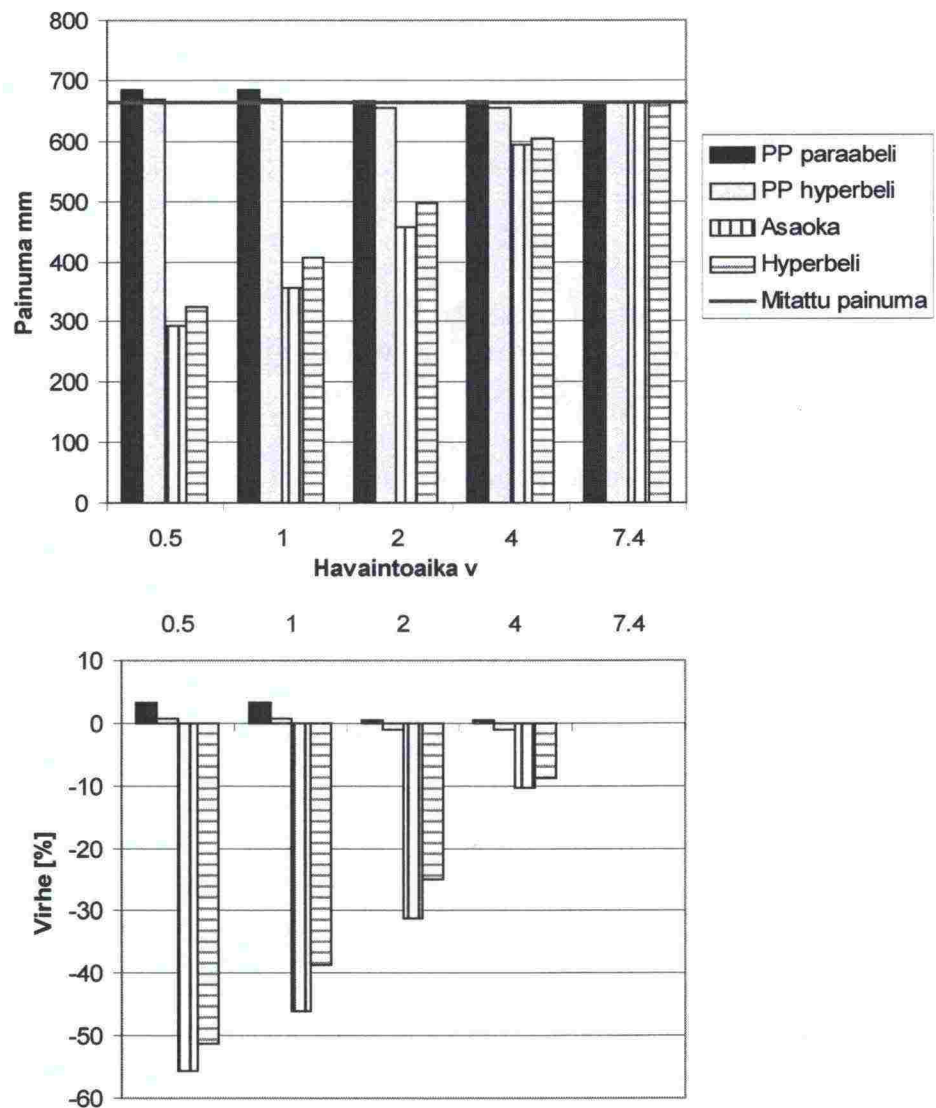


Kuva 21. Murron koepenger. Hyperbelimenetelmän mukainen painuma-arvio 7,4 vuoden painumahavaintojen perusteella. Parametrien mukainen painuma 20 vuoden kuluttua on 783 mm

Hyperbelimenetelmän mukainen sovitus on esitetty kuvassa 21. Uudet havainnot ovat jälleen muuttaneet sovitusta. Painuma-arvio 20 vuoden kuluttua on 783 mm. Edellisillä parametreillä se olisi 673 mm.

Yhteenveto

Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut 7,4 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat ja niiden suhteelliset virheet on esitetty kuvassa 22. Kuten tästä, ja edellisistä kuvista voidaan päätellä, on Asaoka ja hyperbeli menetelmillä tehdyt painuma-arviot täysin riippuvaisia käytössä olevasta havaintoajasta. Kuten edellisistä kuvista voidaan havaita, on kummankin menetelmän eri ajanjaksoina tehdyt sovitukset näyttäneet silmämääräisesti melko hyviltä. Tästä, sekä siitä johtuen, että menetelmät eivät pohjautu mihinkään yleisesti tunnustettuun teoriaan, on näiden menetelmien luotettavuus tässä kohteessa hyvin huono. Menetelmien antaman painuma-arvion hyvyttä on myös hyvin vaikea arvioida.



Kuva 22. Murron koepenger. Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 7,4 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat, ja niiden suhteelliset virheet.

Painumapotentialimenetelmällä on sitä vastoin saatu varsin hyvä arvio 7,4 vuoden painumasta jo puolen vuoden havaintojen perusteella sekä paraabeli- että hyperbelisovituksilla. Kummassakin tapauksessa parametrit ovat ainoastaan hieman tarkentuneet kun havaintomäärä on kasvanut.

Kuten esimerkiksi kuvasta 19 voidaan havaita, vaihtelee havainnoista lasketun painumapotentialin arvo verrattain paljon peräkkäisillä havaintoajoilla. Koska sen laskemiseen käytetään aika-painumahavainnoista suoraan laskettua derivaattaa on vaihtelu täysin luonnollinen.

Lähtötietojen perusteella arvioitu painumapotentialin arvo piti erittäin hyvin paikkaansa. Kaikissa sovituksissa käytetyt arvot olivat arvioidun vaihteluvälin $S_p = 200 \dots 210$ mm sisäpuolella. Hiipumaluvun kenttäarvo on tulosten perusteella $r_s = 100$, mistä voidaan edelleen määrittää muodonmuutosnopeusparametrille arvo $B = 0,07$. Ajan t_{50} arvio ei sitä vastoin pitänyt lainkaan paikkaansa. Konsolidaatiokertoimen kenttäarvoksi saatiinkin noin kymmenkertainen arvo arviossa käytettyyn nähden ($c_{vk} = 15,4 \text{ m}^2/\text{a}$). Tämä pitää yhtä Selkämaan (1994) havaintojen kanssa. Selkämaa totesi, että aika-painuma laskussa tarvittaisiin noin 15-kertainen konsolidaatiokertoimen arvo ödometrikokeen arvoihin nähden jotta laskenta vastaisi mitattua käyttäytymistä.

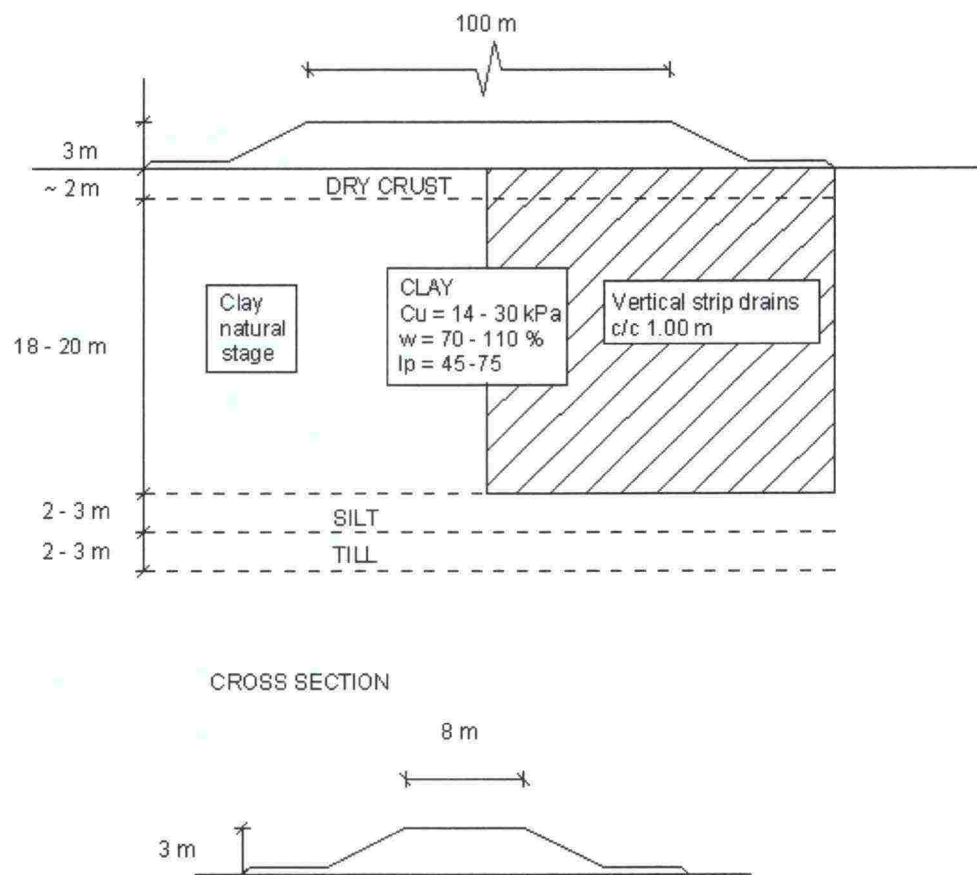
Edellä olevat painuma-arviot pohjautuvat eri pisteistä mitattujen painumien keskiarvoihin. Yksittäisten pisteiden 7,4 vuoden havaintoja vastaavat sovituksukset on esitetty liitteessä II.

4.2.3 Haarajoen koepenger

Haarajoen koepenger rakennettiin Tielaitoksen järjestämän painumalaskentakilpailun yhteydessä. Kilpailutehtävänä oli laskea savikolle rakennetun koepenkeren painumia, siirtymiä ja huokosvedenpaineen muutoksia kahden vuoden aikana. Koepenger rakennettiin kesällä 1997, sen jälkeen kun kilpailuvastaukset oli jätetty. Koepenger kuuluu SRRK -projektin Vt 4 (E75) Järvenpää - Lahti maarakenteisiin sisältyvänä meluvallin osana, ja sen rakensi Tielaitoksen Uudenmaan tiepiiri.

Koepenger on pituudeltaan 100 metriä ja se rakennettiin savikolle osittain maanvaraisesti ja osittain pystyojitetun maapohjan varaan, kuva 23. Kummankin osan pituus on 50 metriä. Penkeren harjan leveys on 8 m ja pengerkorkeus 3 m. Rakentamisen aikana tehtyjen mittausten perusteella penkeren keskimääräiseksi tilavuuspainoksi saatiin 21 kN/m^3 .

Pohjamaa muodostuu noin 2 m paksusta kuivakuorikerroksesta, jonka alapuolella on 18 – 20 m paksu, pehmeä liejuinen savikerros. Saven vesipitoisuus on tyypillisesti välillä 70-110 % ja suljettu leikkauslujuus 14 – 30 kPa. Ödometrikokeiden perusteella osa savikerroksista on selvästi ylikonsolidoituneita. Esikonsolidaatiojännityksen ylittymisen jälkeen saven rakenne ”romahtaa” mikä näkyy pieninä moduuliluvun ja suurina negatiivisina jännitysekspONENTIN arvoina.



Kuva 23. Haarajoen koepenger, Tiehallinto (2001).

Likimääräisen, saven vesipitoisuuden perustuvan painumalaskennan perusteella primaaripainuma on noin 700 – 1000 mm. Primaaripainumaa vastaava painumapotentiaali olisi tämän perusteella noin $S_p = 175 - 250$ mm. Kuvan 4 perusteella in situ hiipumaluku on noin $r_s = 50 - 100$, mistä saadaan $S_p = 190 - 380$ mm. Olettamalla jännitysekspONENTtia $\beta = 0$ vastaavaksi keskimääräiseksi moduuliluvuksi $m = 4$ ja muodonmuutosnopeusparametriksi $B = 0,08$ saadaan hiipumaluvuksi $r_s = 4/B = 50$, mistä $S_p = 380$ mm. On tosin huomattava, että savi on lievästi ylikonsolidoitunutta, ja että ylikonsolidoituneella alueella hiipuma on kertaluokkaa pienempää.

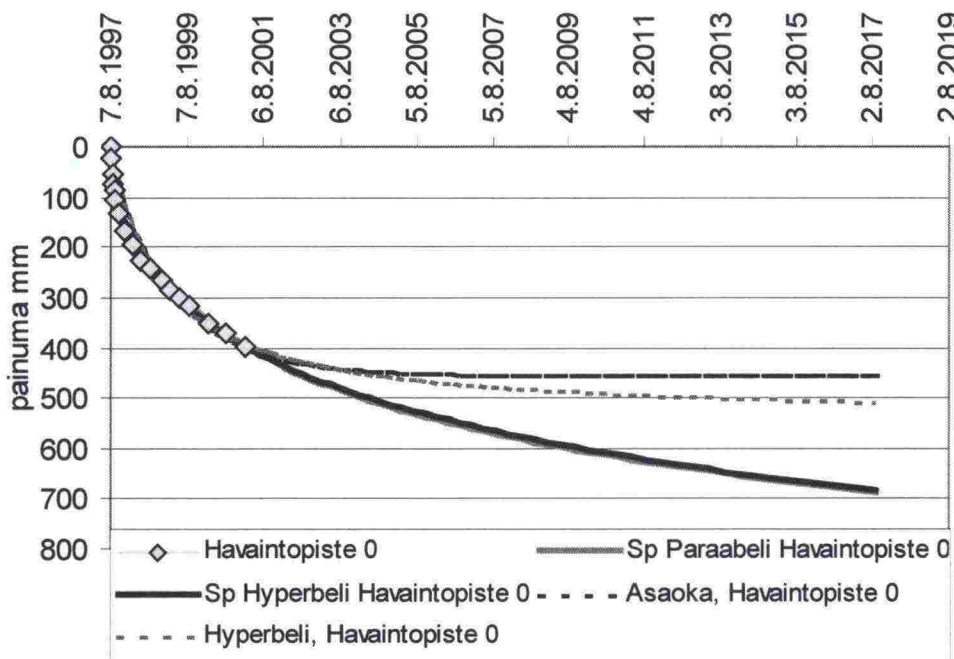
Painumapotentiaalin maksimiarvona on ensimmäisissä arvioissa käytetty $S_p = 300...330$ mm, olettaen, että savi käyttäytyy pääosin normaalikonsolidoituneesti. Mikäli puolet lisäkuormasta tulee ylikonsolidoituneelle alueelle on painumapotentiaalin maksimiarvo suuruusluokaltaan puolet edellistä pienempi.

Havaintoajat 0,5 – 2 v

Painumahavaintoja penkereestä on toistaiseksi kertynyt 3,5 vuoden ajalta. Puolen vuoden, vuoden ja kahden vuoden havaintoajoja vastaavat 3,5 vuoden painuma-arviot ja niitä vastaavat sovitukset on esitetty liitteessä III. Vertailu mitattuihin painumiin on esitetty myös kuvissa 26 ja 27.

Havaintoaika 3,5 v

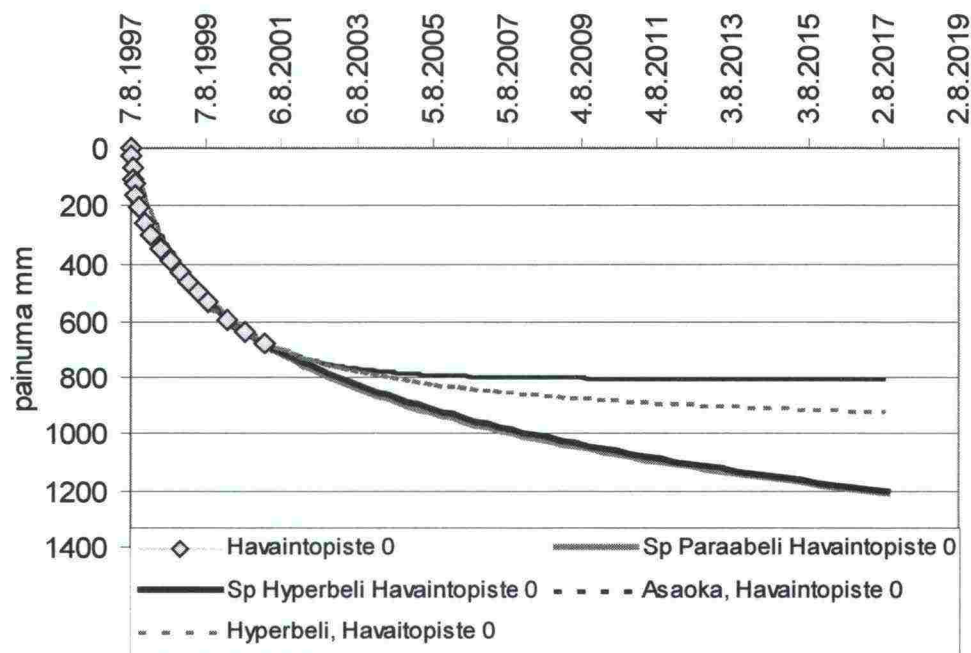
Pisin käytössä oleva havaintoaika Haarajoen koepenkerestä oli 3,5 vuotta. Tätä vastaavat painuma-arviot on esitetty kuvassa 24 maanvaraisen penkereen osalta ja kuvassa 25 pystyöjitetun penkereen osalta. Painumia on pyritty ennustamaan 20 v päähän penkereen rakentamisesta. Eri menetelmillä tehdyt 20 vuoden painuma-arviot on myös esitetty taulukoissa 3 ja 4.



Kuva 24. Haarajoen koepenger. Eri menetelmillä tehdyt painuma-arviot 3,5 vuoden painumahavaintojen perusteella koepenkeren maanvaraisen osuuden keskilinjalla.

Taulukko 3. Haarajoen koepenger. Eri menetelmillä ja ajanjaksoilla tehdyt 20 vuoden painuma-arviot koepenkeren maanvaraisen osuuden keskilinjalla.

Havaintoaika	Painuma-arvio mm			
	0,5 v	1 v	2 v	3,5 v
PP Paraabeli	947	741	697	686
PP hyperbeli	918	726	684	684
Asaoka	226	259	343	458
Hyperbeli	263	311	443	510



Kuva 25. Haarajoen koepenger. Eri menetelmillä tehdyt painuma-arviot 3,5 vuoden painumahavaintojen perusteella koepenkereen pystyojitetun osuuden keskilinjalla.

Taulukko 4. Haarajoen koepenger. Eri menetelmillä ja ajanjaksoilla tehdyt 20 vuoden painuma-arviot koepenkereen pystyojitetun osuuden keskilinjalla.

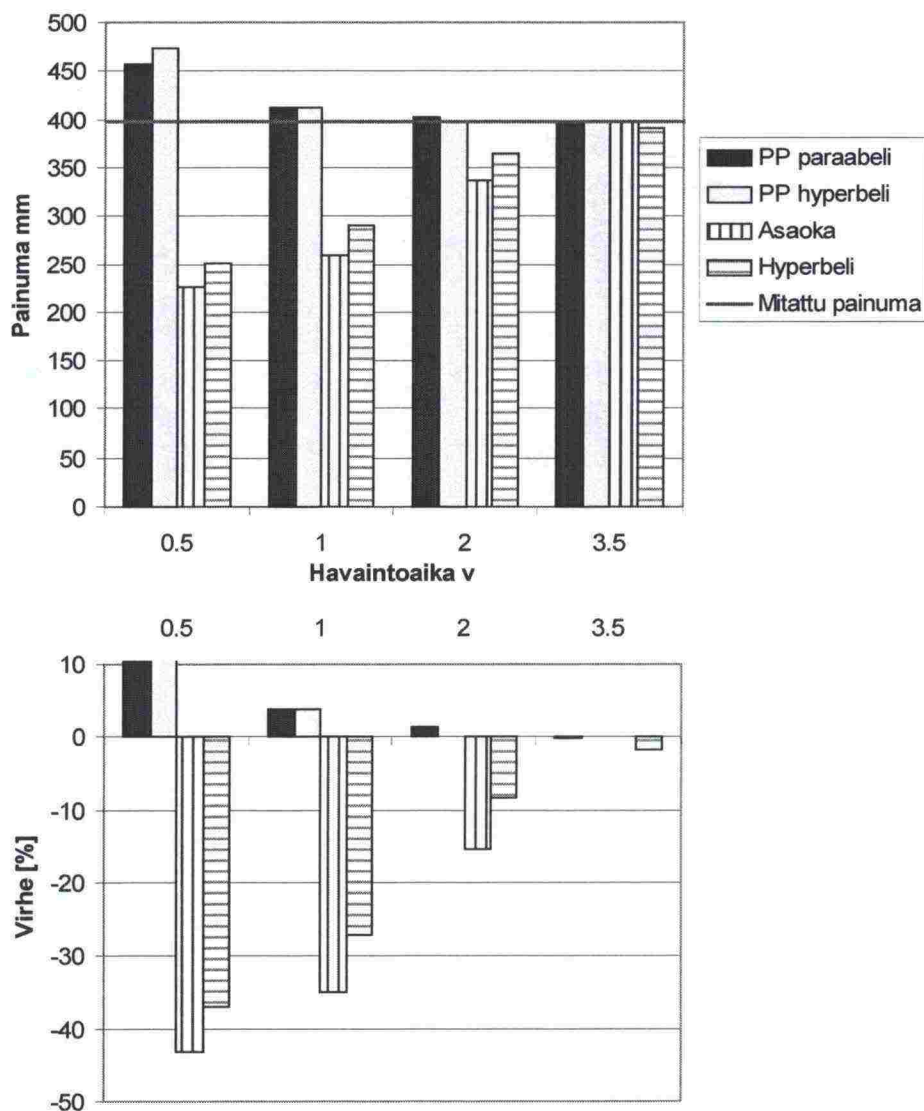
Havaintoaika	Painuma-arvio mm			
	0,5 v	1 v	2 v	3,5 v
PP Paraabeli	1223	1188	1188	1206
PP hyperbeli	1166	1166	1166	1200
Asaoka	333	429	661	804
Hyperbeli	402	534	755	923

Yhteenveto

Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 3,5 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat maanvaraisen koepenkereen keskilinjalla, ja niiden suhteelliset virheet on esitetty kuvassa 26. Asaokan ja hyperbeli menetelmillä tehdyt painuma-arviot ovat hyvin riippuvaisia käytössä olevasta havainto-ajasta. Kummallakin menetelmällä eri ajanjaksoina tehdyt sovitukset ovat kuitenkin silmämääräisesti näyttäneet melko hyviltä. Menetelmien luotettavuus on näin ollen tässäkin kohteessa huono.

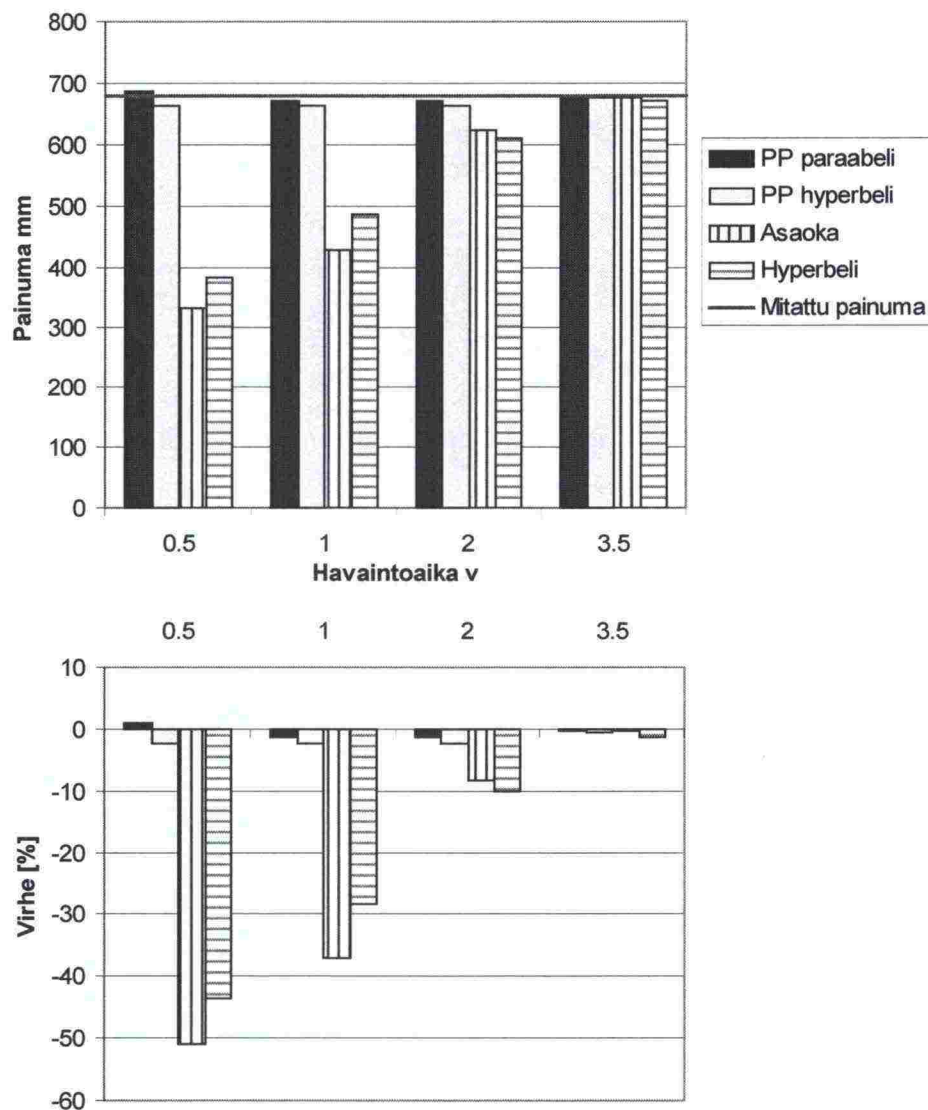
Painumapotentiaalimenetelmällä on saatu hyvä arvio 3,5 vuoden painumasta vuoden havaintojen perusteella sekä paraabeli- että hyperbelisovituksilla. Puolen vuoden havaintojen perusteella tehdyssä arviossa virhettä on hieman enemmän.

Maanvaraisella penkereellä saatiin hiipumaluvun kenttäärvoksi noin $r_s = 110$ ja sitä vastaavaksi muodonmuutosnopeusparametriksi $B = 0,046$. Konsolidaatiokertoimen kenttäärvoksi saatiin $c_{vk} = 5,9 \text{ m}^2/\text{a}$.



Kuva 26. Haarajoen koepenger. Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 3,5 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat koepenkeren maanvaraisen osuuden keskilinjalla, sekä niiden suhteelliset virheet.

Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 3,5 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat pystyojitetun koepenkeren keskilinjalla, ja niiden suhteelliset virheet on esitetty kuvassa 27. Asaakan- ja hyperbelimenetelmillä tehdyt painuma-arviot ovat jälleen hyvin riippuvaisia käytössä olevasta havainto-ajasta, eikä näillä menetelmillä ole pystytty ennustamaan tulevia painumia.



Kuva 27. Haarajoen koepenger. Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 3,5 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat koepenkereen pystyojitetun osuuden keskilinjalla, sekä niiden suhteelliset virheet.

Painumapotentialimenetelmällä on saatu hyvä arvio 3,5 vuoden painumasta jo puolen vuoden havaintojen perusteella sekä paraabeli- että hyperbelisovituksilla. Syy parempaan arvioon jo puolen vuoden havaintojen perusteella verrattuna maanvaraiselle osuudelle tehtyyn arvioon on tehdyissä alkuotaksumissa. Kummassakin tapauksessa arvioitiin, että painumapotentialin lopullinen arvo on noin $S_p = 300...330$ mm. Pystyojitetun osuuden osalta tämä näyttää pitävän paikkansa, kun sitä vastoin maanvaraisen osuuden arvo on selvästi pienempi (170...180 mm) ja tarkentui havaintomäärän lisääntyessä. Pienempi arvo maanvaraisella osuudella johtuu todennäköisesti saven ylikonsolidaatiosta. Osa kuormasta on tullut saven ylikonsolidoituneelle alueelle jolloin primaari- ja sekundaaripainuma on selvästi pienempää. Pystyojitetulla osuudella pystyojituksen tekeminen on todennäköisesti rikkonut häiriintymisherkän saven rakennetta siinä määrin, että savi on käyttäytynyt normaalikonsolidoituneesti koko kuormalla.

Pystyjoituksella saadaan myös yleensä suurempia painumapotentiaalin arvoja kun vastaavalla maanvaraisella osuudella. Tavallisesti kuitenkin painumapotentiaalin arvo saavuttaa maksimiarvon verrattain nopeasti ja myös pienenee lyhyen ajan kuluessa kun primaaripainuminen on tapahtunut. Vastaavaa käyttäytymistä ei ainakaan toistaiseksi ole havaittavissa Haarajoen koepenkereessä.

Pystyjoitetulla penkereellä saatiin hiipumaluvun kenttäarvoksi noin $r_s = 57$ ja sitä vastaavaksi muodonmuutosnopeusparametriksi $B = 0,088$. Konsolidaatiokertoimen kenttäarvoksi saatiin $c_{vk} = 4,8 \text{ m}^2/\text{a}$.

Edellä olevat painuma-arviot pohjautuvat penkereen keskilinjalta mitattuihin painumiin. Yksittäiset tulokset on esitetty liitteessä III.

4.2.4 Vaasan koepenger

Vaasan koepenger rakennettiin vuonna 1989 Tuovilanjoen varteen tiepenkereiden suunnittelua koskevan painumalaskennan kehittämiseksi. Penkereen korkeus on 2 m, sen harjan mitat ovat 15 m * 25 m ja luiskien kaltevuus 1:1,5. Penger materiaalina käytettiin siltistä moreenia jonka tilavuuspaino on 22,8 kN/m³. Koepengertä koskeva lähtöaineisto on koottu lähteistä Näätänen (1989), Vepsäläinen et al. (1991) sekä tehdyistä painumamittauksista.

Ennen rakentamista penkereen alta poistettiin noin 0,5 m paksu pintamaakerros. Pohjamaa muodostuu noin 40 m paksusta siltisestä savikerroksesta. Kerros on melko homogeeninen, mistä johtuen suurin osa pohjatutkimuksista ulotettiin ainoastaan 15 m syvyyteen. Saven suljettu leikkauslujuus syvyysvälillä 0,5 - 10 m on 10 - 25 kPa, vesipitoisuus 70 - 100 % ja humuspitoisuus noin 5 %.

Ennen rakentamista tehdyissä painumalaskelmissa (Näätänen 1989) saatiin alkupainumaksi 291 mm ja primaariseksi konsolidaatiopainumaksi 1927. Laskelmissa maakerrokset ulotettiin ainoastaan 20 m syvyyteen. Aikapainumalaskelman konsolidaatiokertoimenä käytettiin eri kerroksille arvoja $c_v = 0,08 - 0,51 \text{ m}^2/\text{a}$. Savikerrokset oletettiin normaalikonsolidoituneiksi.

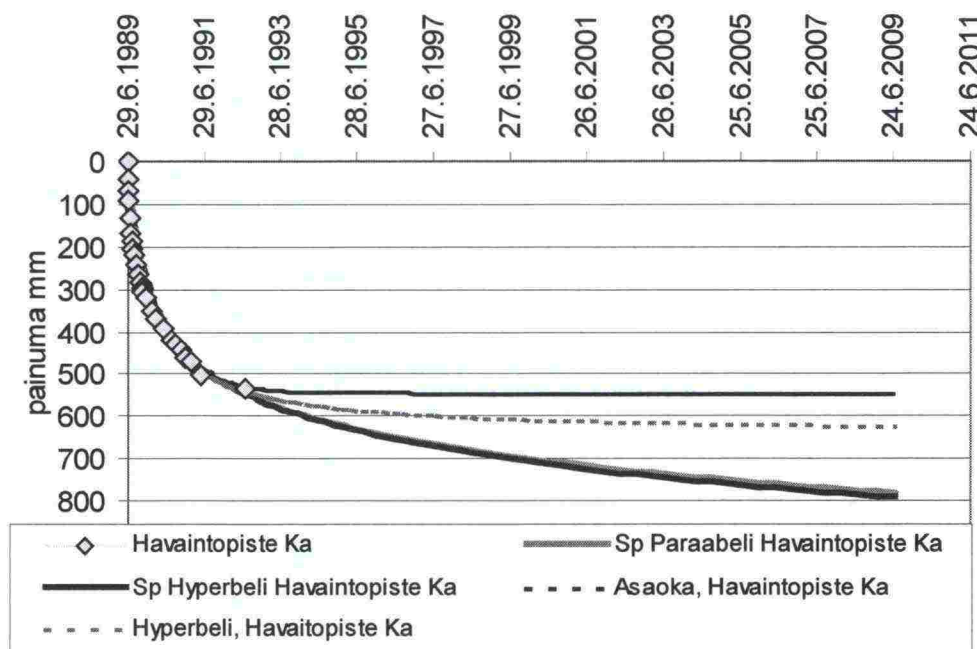
Laskettua primaaripainumaa vastaava painumapotentiaali on noin $S_p = 480$ mm. Kuvan 4 perusteella in situ hiipumaluvun arvoksi voidaan arvioida noin $r_s = 70 - 100$. Olettamalla jännitysekspONENTtia $\beta = 0$ vastaavaksi keskimääräiseksi moduuliluvuksi $m = 6$ ja muodonmuutosnopeusparametriksi $B = 0,07$ saadaan hiipumaluvuksi $r_s = 85$. Mikäli painuvaksi kerrokseksi oletetaan koko 40 m paksu savikerros, saadaan hiipumalukua $r_s = 80$ vastaavaksi painumapotentiaalin arvoksi $S_p = 500$ mm. On kuitenkin sangen epätodennäköistä, että penger aiheuttaa merkittäviä painumia näin paksun savikerroksen alaosassa. Jos vaikutussyvyudeksi oletetaan 20 m kuten painumalaskennassa, saadaan painumapotentiaalin arvoksi $S_p = 250$ mm.

Havaintoaajat 0,5 – 2 v

Painumahavaintoja penkereestä on 3 vuoden ajalta. Puolen vuoden, vuoden ja kahden vuoden havaintoaikoja vastaavat 3 vuoden painuma-arviot ja niitä vastaavat sovitukset on esitetty liitteessä IV. Vertailu mitattuihin painumiin on esitetty myös kuvassa 29.

Havaintoaika 3 v

Pisin käytössä oleva havaintoaika Vaasan koepenkerestä oli 3 vuotta. Tätä vastaavat painuma-arviot on esitetty kuvassa 28. Painumia on pyritty ennustamaan 20 v päähän penkereen rakentamisesta. Eri menetelmillä tehdyt 20 vuoden painuma-arviot on myös esitetty taulukossa 5.



Kuva 28. Vaasan koepenger. Eri menetelmillä tehdyt painuma-arviot 3 vuoden painumahavaintojen perusteella koepenkeren keskiosalla.

Taulukko 5. Vaasan koepenger. Eri menetelmillä ja ajanjaksoilla tehdyt 20 vuoden painuma-arviot koepenkeren keskiosalla.

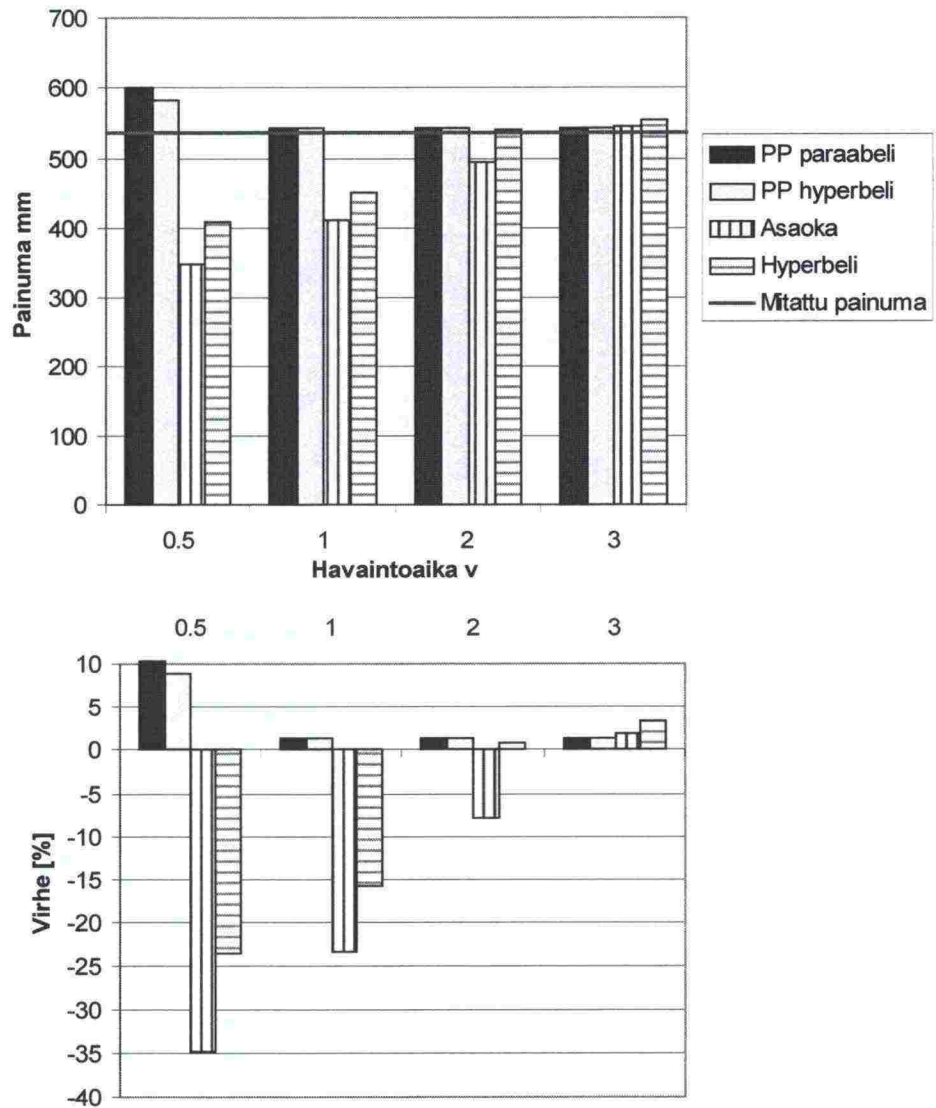
Havaintoaika	Painuma-arvio mm			
	0,5 v	1 v	2 v	3,5 v
PP Paraabeli	876	781	781	781
PP hyperbeli	871	792	792	792
Asaoka	349	411	496	546
Hyperbeli	427	479	627	626

Yhteenveto

Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 3 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat koepenkereen keskellä, ja niiden suhteelliset virheet on esitetty kuvassa 29. Asaokan ja hyperbeli menetelmillä tehdyt painuma-arviot ovat hyvin riippuvaisia käytössä olevasta havaintoajasta. Kummallakin menetelmällä eri ajanjaksoina tehdyt sovitukset ovat kuitenkin silmämääräisesti näyttäneet melko hyviltä. Menetelmien luotettavuus on näin ollen tässäkin kohteessa huono.

Painumapotentiaalimenetelmällä tehty arvio on pysynyt muuttumattomana vuoden havaintoajan jälkeen. Myös puolen vuoden havaintojen perusteella on saatu melko hyvä arvio painumista maksimi havainto aikaan asti. Painumapotentiaalinen arvona on käytetty arvoa noin 130 mm, mikä poikkeaa huomattavasti lähtötietojen perusteella arvioidusta arvosta. Osasyynä virheeseen on arvioitu merkitsevä kerrospaksuus. Painuvan kerroksen paksuuden arvioimisen epätarkkuuden vuoksi ovat painumapotentiaalimenetelmästä saadut kenttäarvot lähinnä suuntaa antavia. Hiipumaluvun kenttäarvoksi saatiin noin $r_s = 120$ ja sitä vastaavaksi muodonmuutosnopeusparametriksi $B = 0,06$. Konsolidaatiokertoimen kenttäarvoksi saatu suuri arvo $c_{vk} = 22 \text{ m}^2/\text{a}$, viittaa myös siihen, että painuvan kerroksen paksuus arvioitiin liian suureksi.

Edellä olevat painuma-arviot pohjautuvat penkereen keskiosasta mitattuihin painumiin. Yksittäiset tulokset on esitetty liitteessä IV.



Kuva 29. Vaasan koepenger. Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 3 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat koepenkereen keskiosalla, sekä niiden suhteelliset virheet.

4.2.5 Paimion koepenger

Paimion koepenkeret rakennettiin vuonna 1989 Helsinki – Turku moottoritien suunnittelun yhteydessä. Koepengeralue sijaitsee Tammisalons eritasoliittymän kohdalla, moottoritien ja ramppien R1 ja R2 välissä. Koepengeralue koostuu neljästä koepenkerestä, joista kolme on perustettu syvästabiloinnin varaan ja yksi maanvaraisesti. Tässä raportissa käsitellään ainoastaan maanvaraisesti perustettua koepengertä.

Penkereen korkeus on 1,85 m, sen harjan mitat ovat 10 m * 10 m ja luiskien kaltevuus 1:1,5. Pengermateriaalina käytettiin hiekkaa jonka tilavuuspaino on 18,5 kN/m³. Koepengertä koskeva lähtöaineisto on koottu lähteistä

Vepsäläinen ja Arkima (1992), Vepsäläinen et al. (1991), Karstunen (1993) sekä tehdyistä painumamittauksista.

Pohjamaa muodostuu hieman yli metrin paksusta kuivakuorikerroksesta, jonka alapuolella on 12-13 m paksu pehmeä savikerros. Pehmeän savikerroksen siipikairalla määritetty suljettu leikkauslujuus vaihtelee välillä 10 – 20 kPa, vesipitoisuus välillä 60 – 85 % ja humuspitoisuus välillä 1 - 2 %. Ödometrikokeiden perusteella savi on lähes normaalikonsolidoitunutta (Vepsäläinen et al. 1991).

Vesipitoisuuden ja kuvan 4 perusteella voidaan arvioida, että in situ hiipumaluku on välillä $r_s = 65 - 115$. Olettamalla jännitysekspONENTtia $\beta = 0$ vastaavaksi keskimääräiseksi moduuliluvuksi $m = 7$ ja muodonmuutosnopeusparametriksi $B = 0,07$ saadaan hiipumaluvuksi $r_s = 100$. Hiipumalukua $r_s = 100$ vastaavaa painumapotentialin arvo on $S_p = 120$ mm. Lähteessä Vepsäläinen et al. (1991) esitettyjä muodonmuutosparametrejä ja vedenläpäisevyyskertoimia vastaava keskimääräinen konsolidaatiokerroin on $c_v = 0,8$ m²/a. Ajaksi t_{50} saadaan tällöin $t_{50} = 16,4$ vuotta yksipuolisella kuivatuksella ja $t_{50} = 8,8$ vuotta kaksipuolisella kuivatuksella.

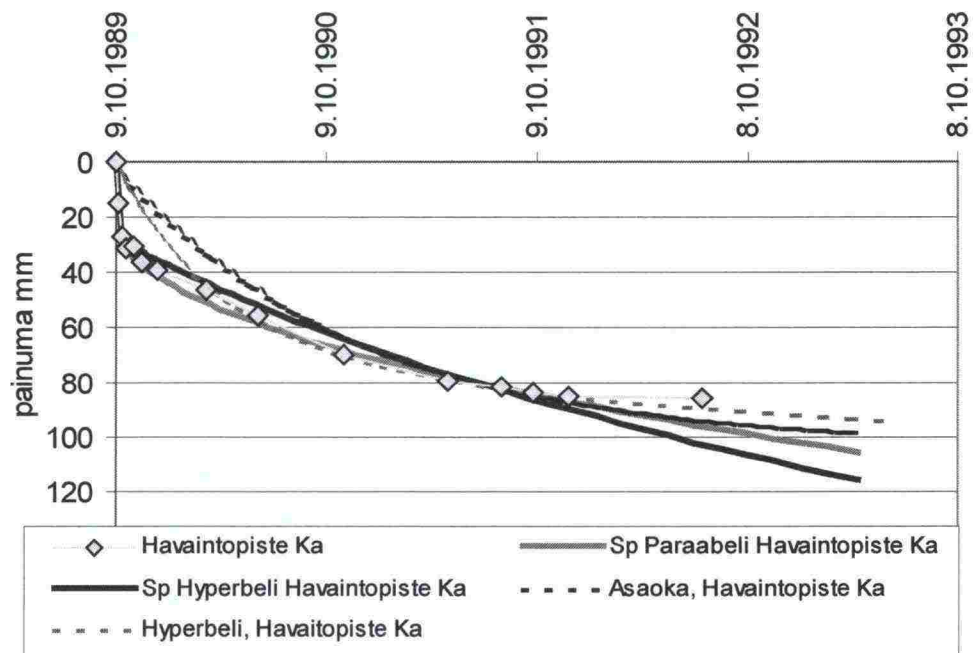
Havaintoajat 0,5 – 1 v

Pisin havaintoaika Paimion koepenkereestä on noin kolme vuotta. Penkereen käyttäytyminen on kuitenkin oleellisesti muuttunut vajaan kahden vuoden kuluttua rakentamisesta. Todennäköisenä syynä tähän on kesällä 1991 aloitettu Tammiston risteyksen syvästabilointi (Karstunen 1993). Tämän jälkeen maanvaraisen penkereen painuminen on pysähtynyt ja kolme stabiloinnin varaan perustettua koepengertä on jopa hieman noussut. Tästä johtuen pidetään pisimpänä havaintoaikana 2 vuoden havaintoja. Painumaennusteita ei myöskään laadita 20 vuodelle koska muuttuneita olosuhteita ei tunneta riittävän hyvin.

Puolen vuoden ja vuoden havaintoaikoja vastaavat 2 vuoden painuma-arviot ja niitä vastaavat sovitukset on esitetty liitteessä V. Vertailu mitattuihin painumiin on esitetty myös kuvassa 32.

Havaintoaika 2 v

Kahden vuoden painuma-aikaa vastaavat painuma-arviot on esitetty kuvassa 30. Kuvassa on myös kolmen vuoden painumahavainnot, mistä nähdään, että pengeri ei viimeisellä painumamittauskerralla ollut painunut lainkaan.



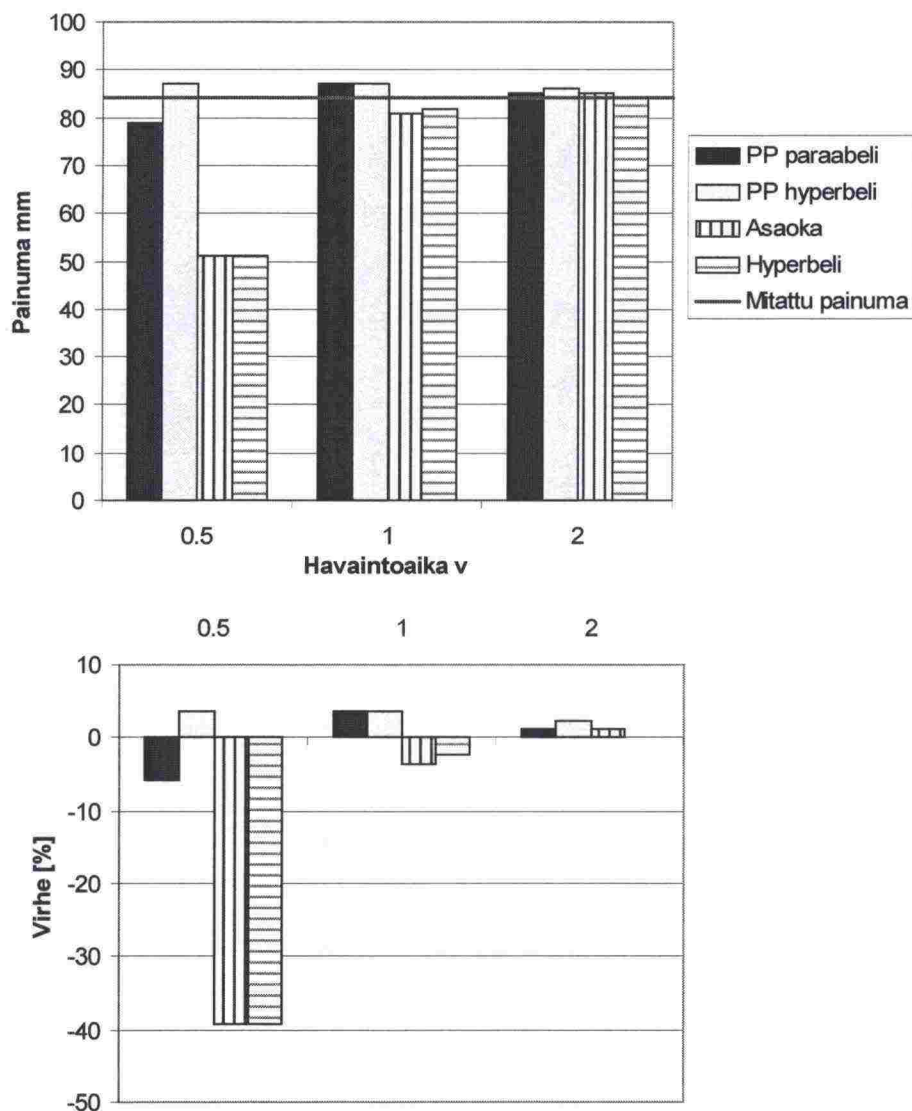
Kuva 30. Paimion koepenger. Eri menetelmillä tehdyt painuma-arviot 2 vuoden painumahavaintojen perusteella.

Yhteenveto

Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 2 vuoden painuma-aikaa vastaavat keskimääräiset painumat, ja niiden suhteelliset virheet on esitetty kuvassa 31. Yleisesti voidaan todeta, että 5 kk havaintoajan kuluessa havaintoja oli liian vähän, jotta niistä voisi tehdä luotettavaa painuma-arviota. Asaoka-menetelmän mukaista painumakäyrää ei saatu sovitettua painumahavaintoihin vaikkakin menetelmä antoi hyvinkin oikean suuruisen painuma-arvion yhden vuoden havaintojen jälkeen. Käytössä ollut vakio-olosuhteita vastaava havaintoaika on liian lyhyt, jotta kohteesta voitaisiin tehdä kovin merkittäviä johtopäätöksiä.

Painumapotentiaalimenetelmän parametreille käytetyt arviot pitivät melko hyvin paikkaansa. Hiipumaluvun kenttäarvoksi saatiin noin $r_s = 120$ arvion ollessa $r_s = 100$. Konsolidaatiokertoimen kenttäarvoksi saatiin $c_{vk} = 0,7 \text{ m}^2/\text{a}$ laboratorioarvon ollessa $c_{vk} = 0,8 \text{ m}^2/\text{a}$. On tosin muistettava, että havaintoaika on liian lyhyt jotta parametri olisi luotettavasti voitu määrittää havainnoista.

Edellä olevat painuma-arviot pohjautuvat mitattujen painumien keskiarvoihin. Yksittäiset tulokset on esitetty liitteessä V.



Kuva 31. Paimion koepenger. Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 3 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat koepenkeren keskiosalla, sekä niiden suhteelliset virheet.

4.2.6 Keravan veturitalli ja kääntölava

Keravan veturitalli ja kääntölavat valmistuivat molemmat vuonna 1932. Ne sijaitsevat Keravan ratapihalla, noin 500 m asemarakennuksesta pohjoiseen. Tässä työssä käytetty aineisto on saatu lähteestä Kantee (1982).

Veturitallin pituus on 23,7 m ja sen leveys vaihtelee välillä 14,5 – 22,0 m. Se on perustettu yhtenäiselle, 500 mm paksulle teräsbetonilaatalle. Kääntölava on perustettu ympyränmuotoiselle laatalle, jonka halkaisija on 22,4 m. Laatan paksuus on keskiosassa 780 mm ja reunoilla 570 mm. Rakenteista ja hyötykuormista laskettu pohjapaine on veturitallin osalla 36 kPa ja kääntölavan osalla 24 kPa (Kantee 1982). Rakenteiden lisäksi maapohjaa kuormittaa 2,0 – 3,5 m paksu täytemaakerros, joka on ilmeisesti rakennettu 1930 luvun alussa.

Pohjasuhteet ovat hyvin samankaltaiset molempien rakenteiden kohdalla. Noin 1,5 – 2,0 m paksun kuivakuorikerroksen alapuolella on savikerroksia, joiden vesipitoisuus ja savipitoisuus pienenevät syvyyden mukaan. Pehmeiden kerrosten vesipitoisuus vaihtelee yleisesti 40 - 80 % välillä ja suljettu leikkauslujuus 15 - 30 kPa välillä. Pehmeiden savikerrosten kokonaispakkaus on veturitallin alapuolella 7,5 – 10,5 m ja kääntölavan alapuolella 6,5 – 8,5 m.

Käytössä olleen, vuonna 1982 valmistuneen tutkimuksen (Kantee 1982) perusteella voidaan painumapotentialimenetelmän lähtötietoja arvioida seuraavasti. Vesipitoisuutta $w = 60 - 70$ % vastaavaksi in situ hiipumaluvuksi voidaan kuvan 4 perusteella arvioida noin $r_s = 100 - 140$. Olettamalla jännityseksponenttia $\beta = 0$ vastaavaksi keskimääräiseksi moduuliluvuksi $m = 9$ ja muodonmuutosnopeusparametriksi $B = 0,06$ saadaan hiipumaluvuksi $r_s = 150$. Hiipumalukua $r_s = 140$ vastaavaksi painumapotentialin arvoksi saadaan Keravan veturitallille noin $S_p = 64$ mm ja kääntölavalle noin $S_p = 54$ mm.

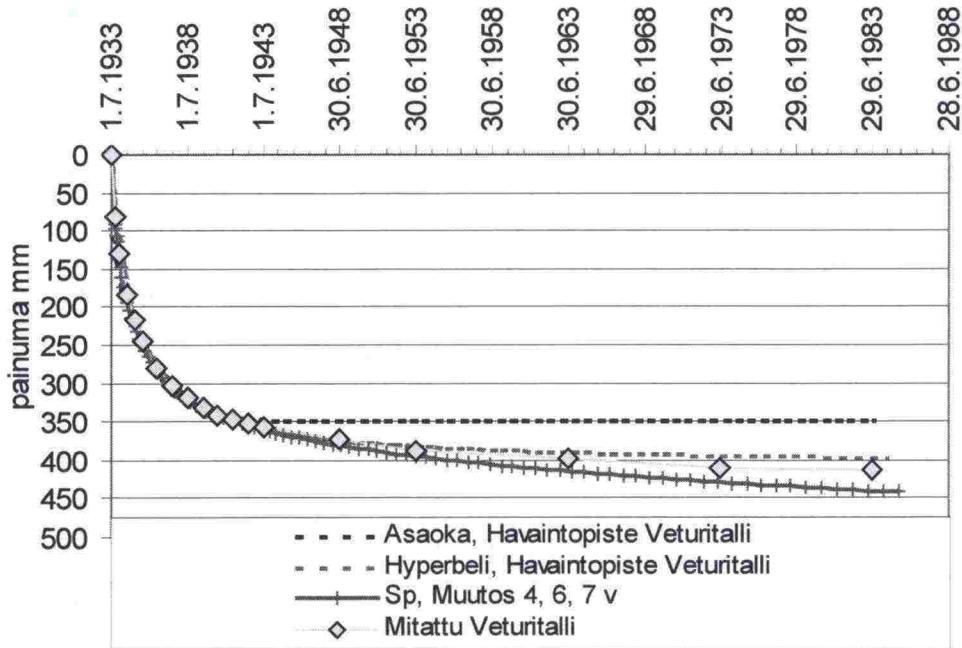
Havaintoajat 1 – 4 v

Painumahavaintoja Keravan veturitallista ja kääntölavasta on 50 vuoden ajalta. Tuona aikana painumapotentialin arvo ei ole ollut vakio kummassakaan kohteessa, vaikka rakenteilta tulevat kuormat eivät ole muuttuneet. Yhtenä selityksenä tähän voi olla hyötykuorman muuttuminen rakennuksen käytön muuttuessa. Koska kokonaiskuormitus on verrattain pieni, vaikuttaa myös pohjavedenpinnan pieni muutos paljon. Osasyynä voi myös olla saven kerroksellisuus. On mahdollista, että kerrallisessa savessa vaakasuuntainen huokosylipaineen purkautuminen on ollut merkittävää, mikä on aiheuttanut havaitun käyttäytymisen. Nopeasti edenneen primaarivaiheen jälkeen painumapotentiali on lähtenyt pienenemään. Käyttäytyminen vastaisi tällöin pystyjakohteissa monesti havaittua.

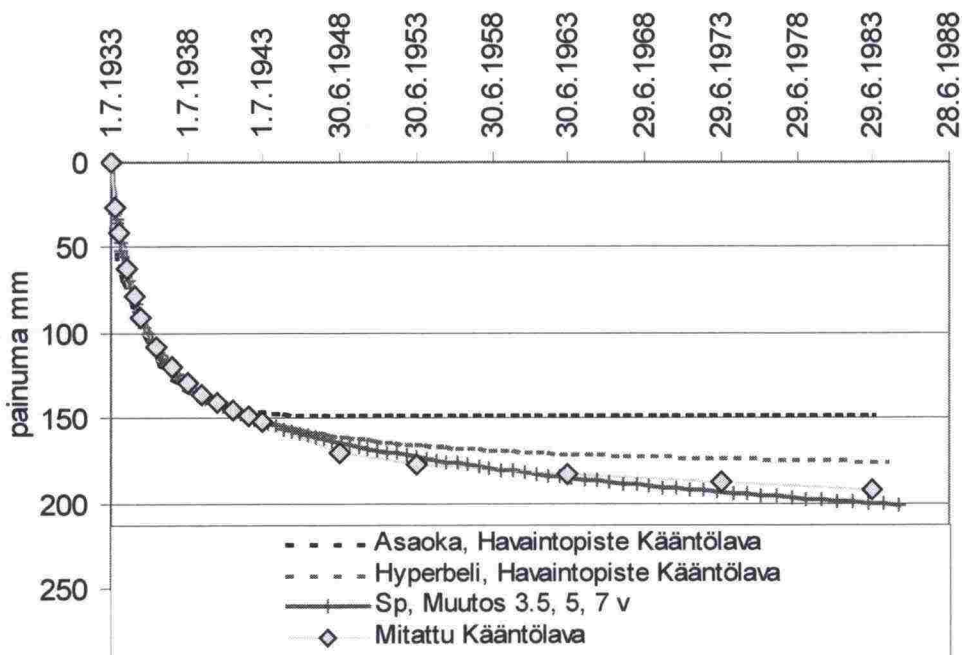
Painuma-arviot on tehty 1, 2, 4, 8 ja 20 vuoden havaintojen perusteella. Painumapotentialin muutos on selvästi havaittavissa neljän vuoden havaintoajan jälkeen. Painumapotentialimenetelmässä on painumapotentialin arvoa pienennetty 8 ja 20 vuoden ennusteissa havaitun käyttäytymisen mukaisesti. Asaokan ja hyperbelimenetelmien ennusteissa on vastaavasti painotettu jälkimmäisiä havaintoja. Vuoden, kahden ja neljän vuoden havaintoajkoja vastaavat painuma-arviot ja niitä vastaavat sovitukset on esitetty liitteessä VI. Vertailu mitattuihin painumiin on esitetty myös kuvissa 35-38.

Havaintoaika 8 v

8 vuoden painumahavaintoihin perustuvat painuma-arviot, ja kaikki 50 vuoden havainnot on esitetty kuvassa 32 veturitallin osalta ja kuvassa 33 kääntölavan osalta.



Kuva 32. Keravan veturitalli. Eri menetelmillä tehdyt painuma-arviot 8 vuoden painumahavaintojen perusteella.



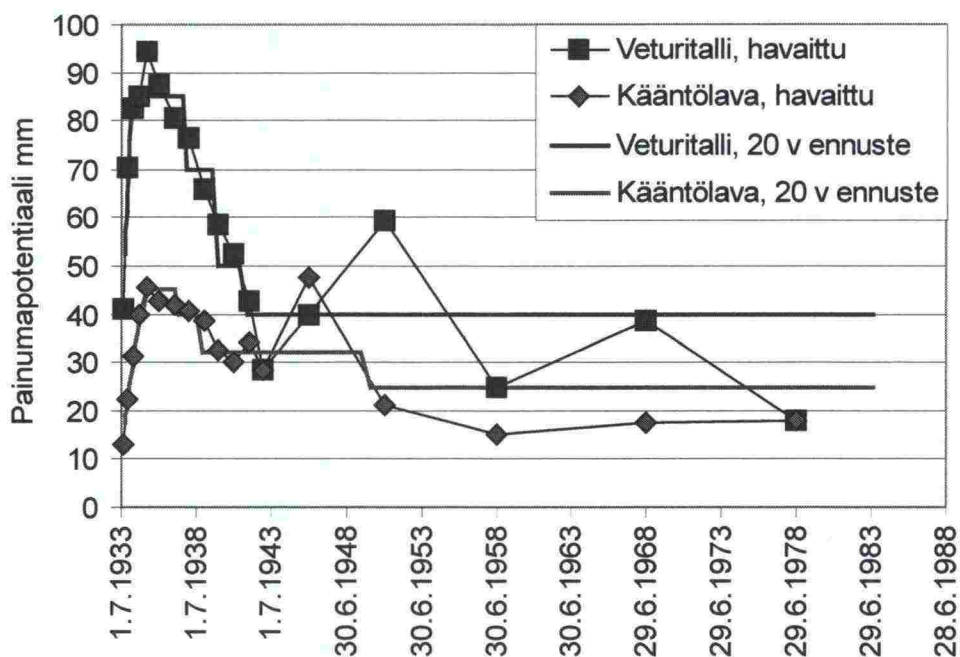
Kuva 33. Keravan kääntölava. Eri menetelmillä tehdyt painuma-arviot 8 vuoden painumahavaintojen perusteella.

Painumia on pyritty ennustamaan koko 50 vuoden havaintoajalla. Veturitallin osalta mitatut painumat sijoittuvat hyperbelimenetelmällä ja painumapotentialimenetelmällä tehtyjen ennusteiden välille. Painumapotentialin arvo on pudonnut yhä 8 vuoden jälkeenkin, mistä johtuen painumapotentialimenetelmä on antanut hieman liian suuren painuma-arvion. Kääntölavan osalta painumapotentialimenetelmä on antanut parhaan arvion, vaikkakin painumapotentialin arvo on siinäkin pudonnut myös kahdeksan vuoden jälkeenkin.

Havaintoaika 20 v

20 vuoden jälkeen tapahtuneet painumat ovat olleet pieniä. Näin ollen on kaikilla menetelmillä päästy hyvään arvioon kokonaispainumasta. Veturitallin osalta painumapotentialimenetelmällä saatiin 50 vuoden painumaksi 420 mm, Asaokan menetelmällä 396 mm ja hyperbelimenetelmällä 407 mm, mitatun painuma ollessa 414 mm. Kääntölavan osalta saatiin vastaavasti painumapotentialimenetelmällä 195 mm, Asaokan menetelmällä 185 mm ja hyperbelimenetelmällä 194 mm mitatun painuman ollessa 192. Koska esimerkiksi Veturitalli painui ennusteaikana ainoastaan 25 mm on Asaokan menetelmän arvion suhteellinen virhe kuitenkin suuri.

Veturitallin ja kääntölavan mitattuja painumia vastaavat painumapotentialikuvaajat on esitetty kuvassa 34 yhdessä 20 vuoden ennusteissa käytettyjen arvojen kanssa.

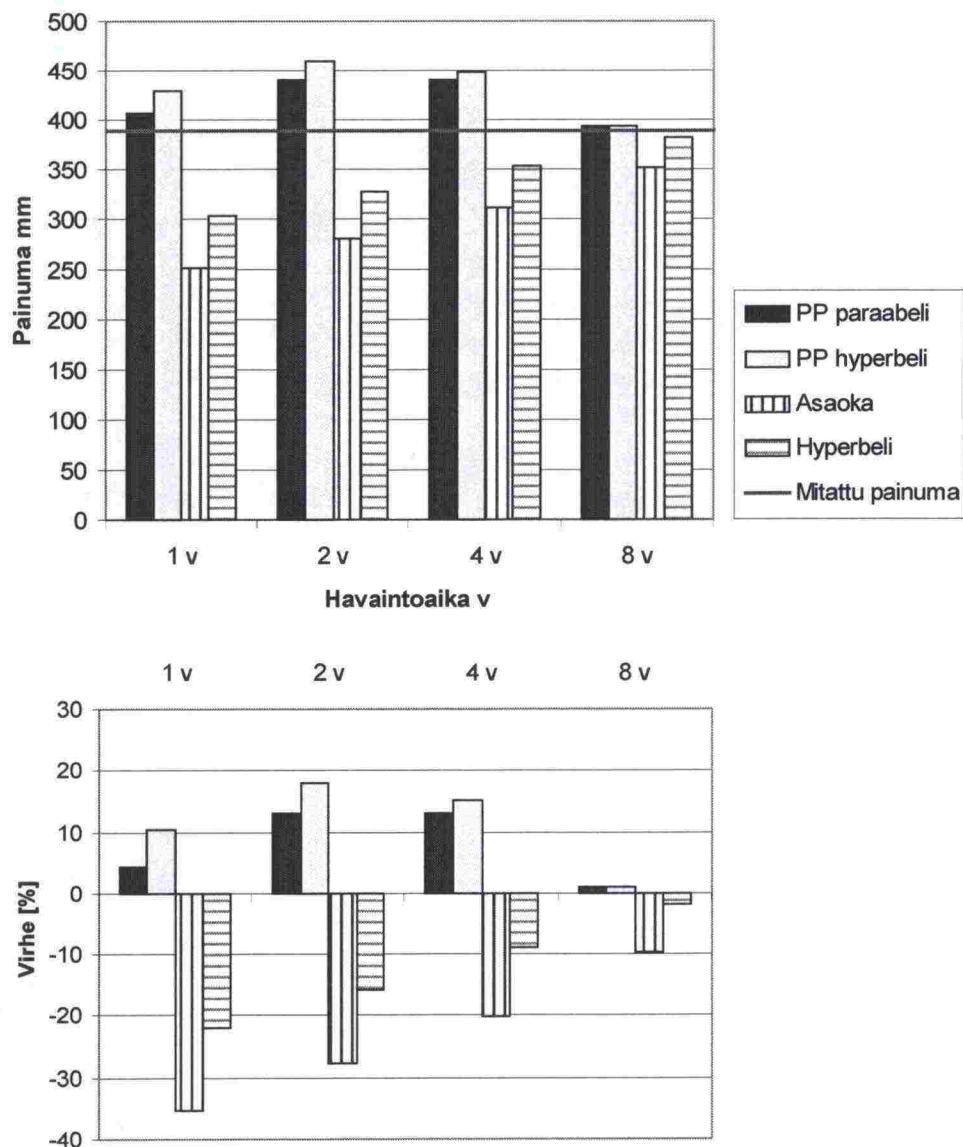


Kuva 34. Kerava. Havaitut sekä 20 vuoden ennusteissa käytetyt painumapotentialin arvot veturitallilla ja kääntölavalla.

Veturitallin osalta painumapotentiaali on saavuttanut maksimiarvonsa noin 2 vuoden kulutta rakentamisesta, minkä jälkeen se on voimakkaasti lähtenyt pienenemään. Kääntölavan osalla painumapotentiaali on ollut verrattain vakio noin 5 vuoden ajan, minkä jälkeen se on lähtenyt pienenemään.

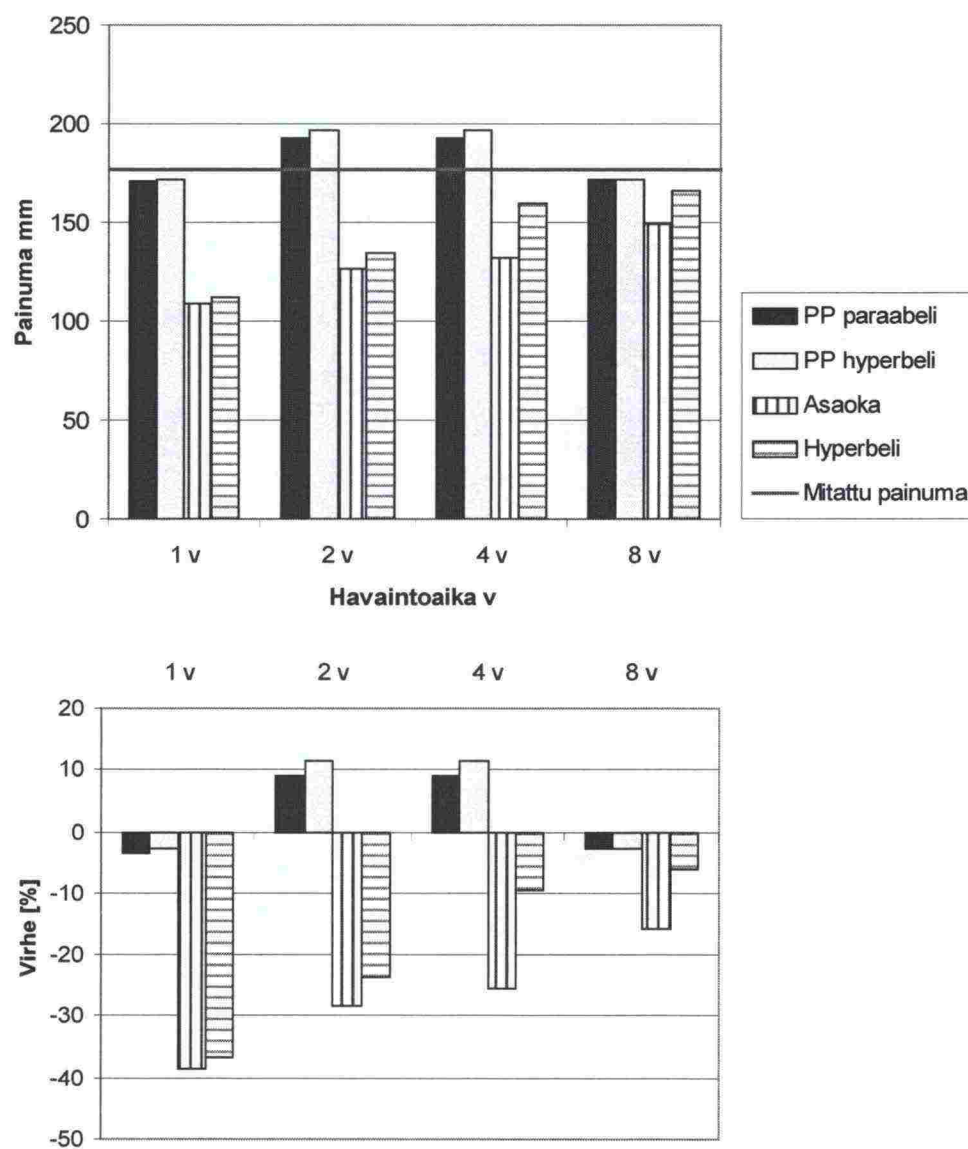
Yhteenveto

Koska Keravan kohteesta oli painumahavaintoja hyvin pitkältä ajalta, laadittiin painuma-arviot sekä 20 että 50 vuoden ajalle.



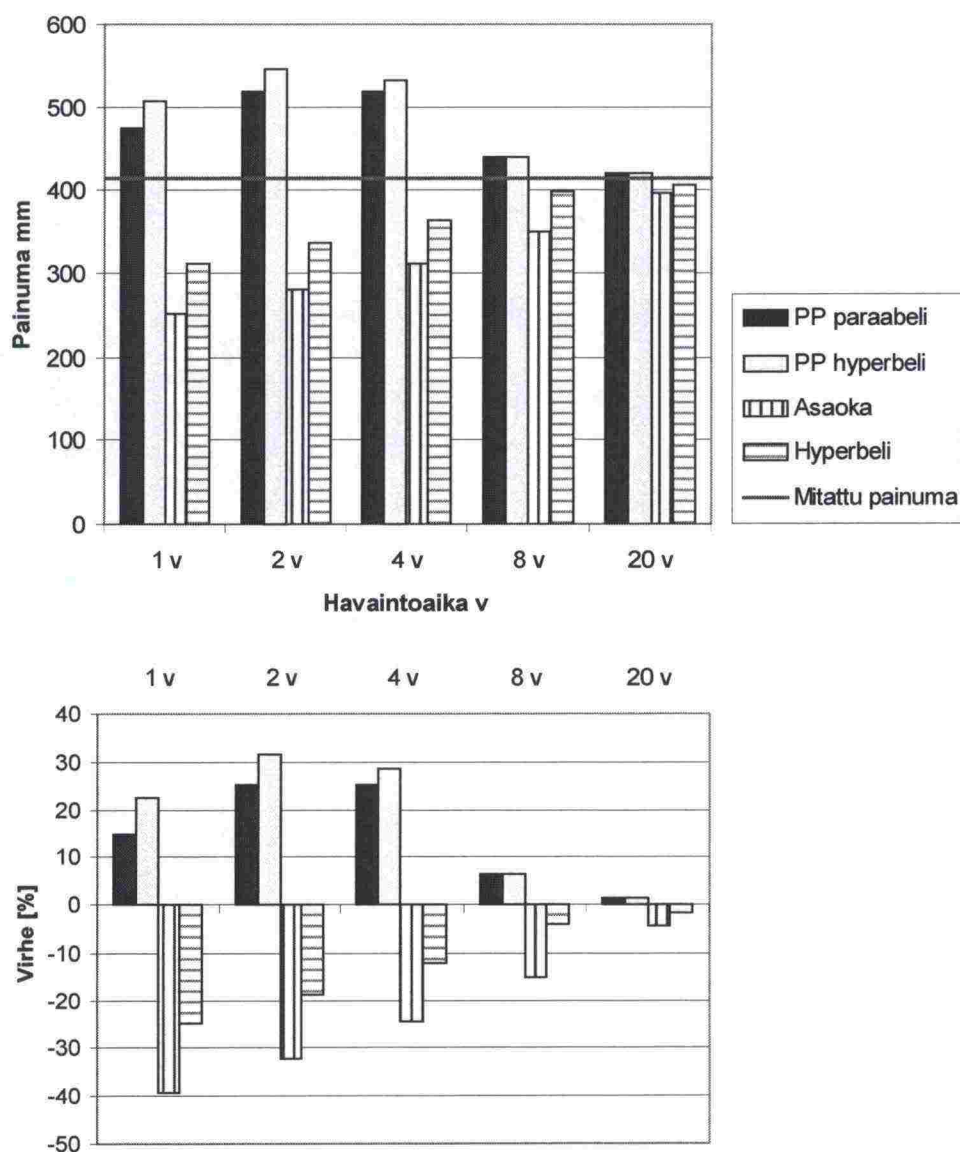
Kuva 35. Keravan Veturitalli. Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 20 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat, sekä niiden suhteelliset virheet.

Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 20 vuoden painuma-aikaa vastaavat painuma-arviot veturitallille ja kääntölavalle on esitetty kuvissa 35 ja 36. Vastaavasti 50 vuoden arviot ja virheet on esitetty kuvissa 37 ja 38. 20 vuoden painuma-arvioiden osalta painumapotentiaalimenetelmällä on saatu melko hyvä arvio painumista jo pienen havaintoajan jälkeen. Kahden ja neljän vuoden havaintoaikojen perusteella tehdyt arviot yliarvioivat kuitenkin painumia käytetystä korkeasta painumapotentiaalin arvosta johtuen. Asaoka menetelmällä tehty arvio on jälleen selvästi aliarvioinut painumia. Hyperbelimenetelmällä on saatu verrattain hyvä painuma-arvio neljän vuoden havaintoajan jälkeen.



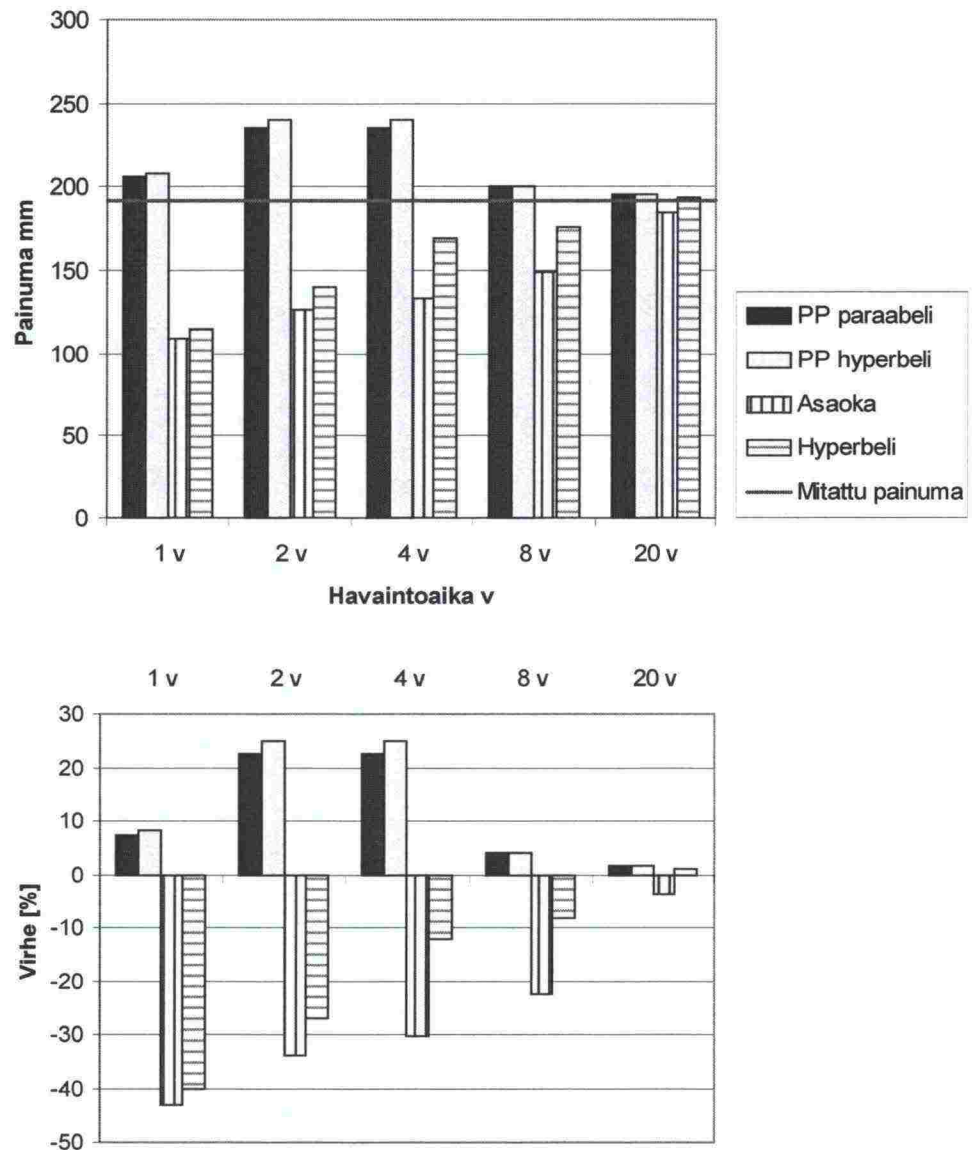
Kuva 36. Keravan kääntölava. Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 20 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat, sekä niiden suhteelliset virheet.

50 vuoden painuma-arvioiden osalta painumapotentialimenetelmällä tehdyt arviot aina neljän vuoden havaintoaikaan saakka ovat selvästi ylittäneet mitatut painumat. Arvioissa korostuu lyhyeen havaintoaikaan perustuva korkean painumapotentialin käyttö, katso kuva 34. Ero on suuri etenkin Veturitallin osalla. Asaoka ja hyperbelimenetelmällä saadut painuma-arvot ovat edelleen hyvin riippuvaisia havaintoajasta. Nämä menetelmät vaativatkin melko pitkän havaintoajan ohjaamaan painuma-arviota jotta se tarkentuisi pitkänajan havaintoihin. Muodoltaan 50 vuoden painumakäyrä vastaa melko hyvin hyperbeliä, mutta oikeiden parametrien arvioiminen vaatii vähintään 8



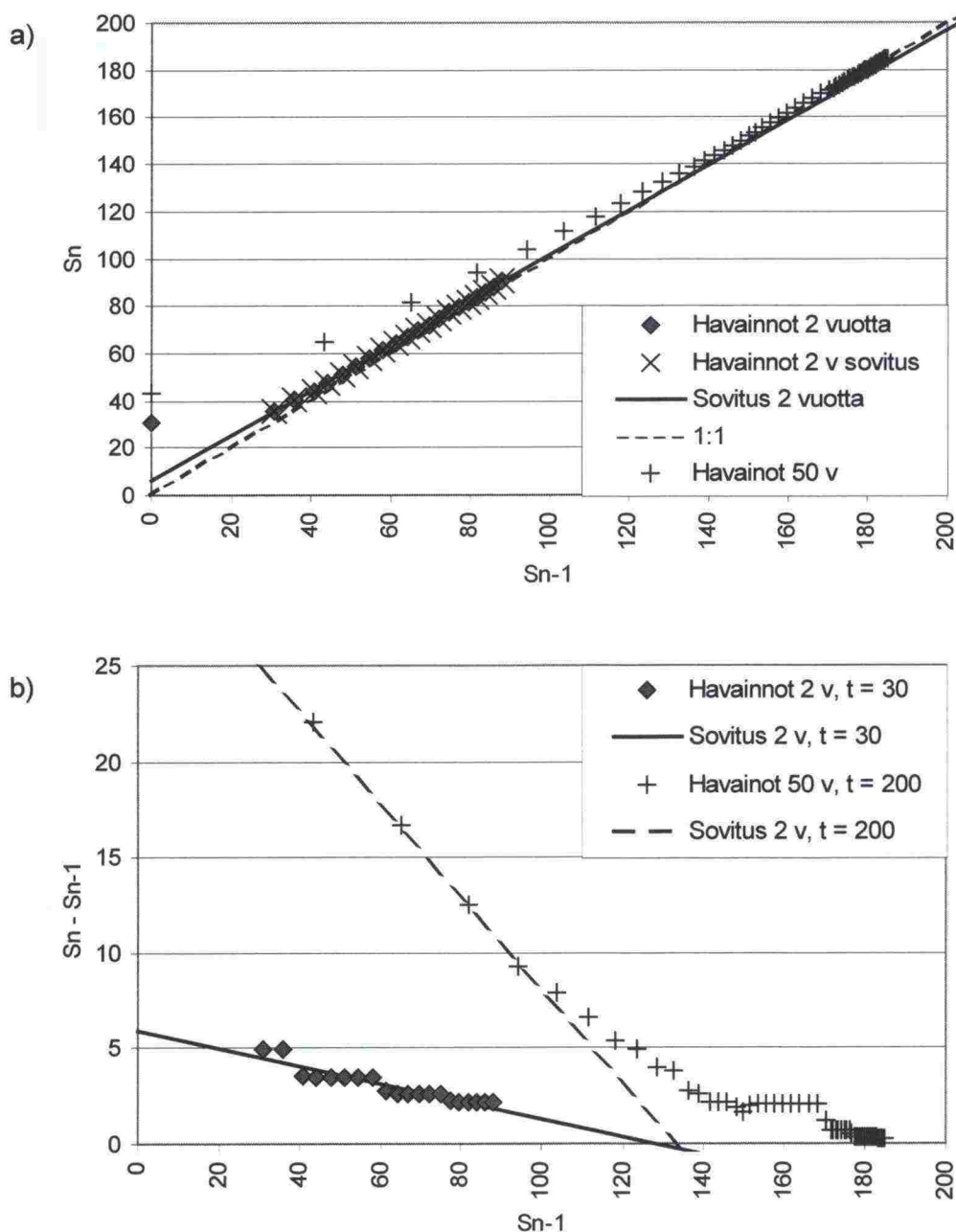
vuoden havainnot.

Kuva 37. Keravan veturitalli. Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 50 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat, sekä niiden suhteelliset virheet.



Kuva 38. Keravan kääntölava. Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 50 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat, sekä niiden suhteelliset virheet.

Koska Keravan kohteista on hyvin pitkäaikaiset havainnot on siinä hyvä tarkastella lähemmin eri menetelmiä. Kuvassa 39 a) on esitetty Asaokan menetelmän mukainen sovitus 2 vuoden painumahavaintoihin. Aikavälinä on käytetty 30 vuorokautta. Silmämääräisesti sovitus näyttää hyvältä. Kuvaan on myös piirretty havainnot koko 50 vuoden ajalta käyttäen nyt aikaväliä 200 vuorokautta. Uudet, havainnot näyttävät osuvan lähes samalle suoralle, eli ero kahden vuoden havaintojen perusteella tehdyn sovituksen ja 50 vuoden havaintojen välillä näyttää pieneltä. Esitystapa antaa kuitenkin todellisuudesta väärän kuvan.

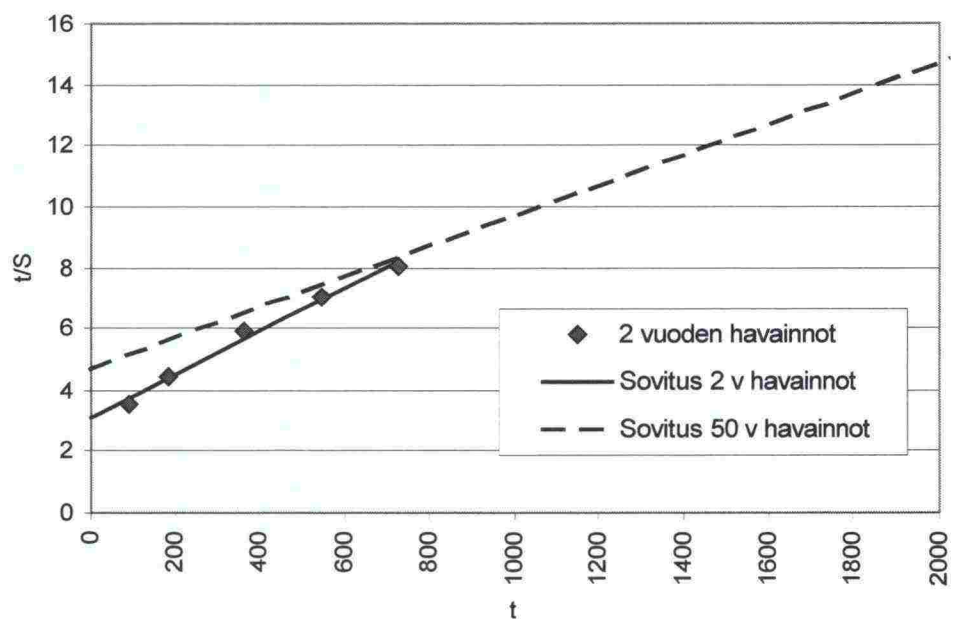


Kuva 39. Keravan kääntölava. Asaakan menetelmän virheellisten oletusten ja esitystavan huonon erotettavuuden havainnollistaminen.

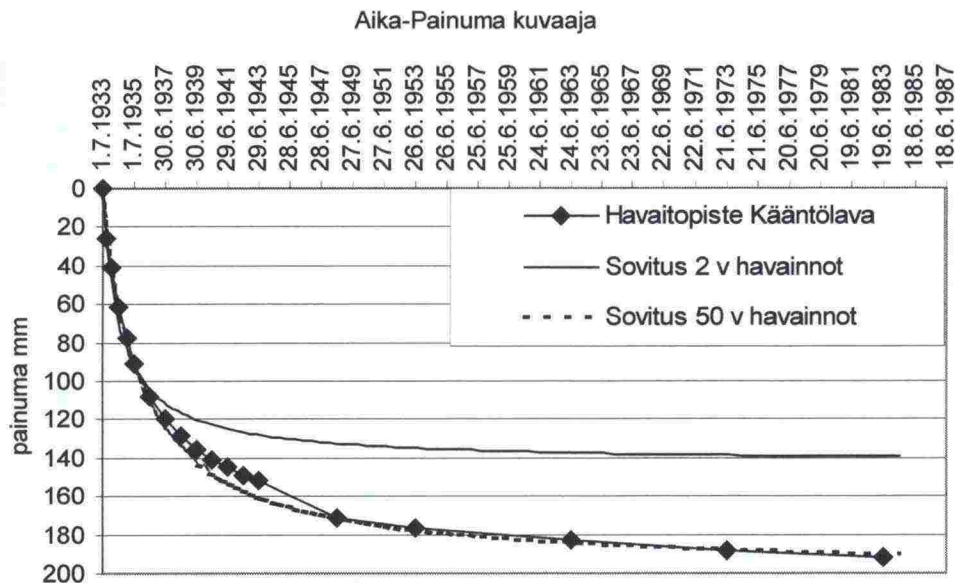
Havainnollisempi esitys saadaan, kun y-akselin painuma-arvoista S_n vähennetään x-akselin painuma-arvo S_{n-1} , kuva 39 b). Tässä koordinaatistossa havaintojen pitäisi Asaakan menetelmän mukaan asettua alaspäin kulkevalle suoralle, jonka x-akselin leikkauspiste vastaa lopullista painumaa. Nyt ero 2 ja 50 vuoden havaintojen välillä on varsin selvä. Ero johtuu osin käytetystä aikavälistä. Tämä vaikuttaa suoran sijaintiin ja kaltevuuteen eli aikapainumakäyrän muotoon, mutta ei juurikaan menetelmän antamaan kokonaispainuman arvoon. Esimerkiksi 2 vuoden havaintojen perusteella piirretyn

suoran ja x-akselin leikkauskohdasta saadaan kokonaispainumaksi noin 130 mm. Vastaava kokonaispainuma saadaan myös aikavälin $t = 200$ mukaan piirrettyjen tuloksiin sovitettun suoran avulla, kun havainnoista käytetään vain kahden ensimmäisen vuoden arvoja, katso kuva 39 b). Kuvasta kuitenkin nähdään, että pitkällä aikavälillä havainnot eivät asetu Asaakan menetelmän oletusten mukaisesti suoralle eikä kokonaispainuma ole vielä päättynyt 180 mm painumankaan jälkeen koska x-akselia ei ole saavutettu. Mikäli 50 vuoden havainnot olisi piirretty käyttäen aikaväliä $t = 30$ asettuisivat havainnot luonnollisesti 2 vuoden havaintojen päälle. Ne eivät kuitenkaan jatkaisi sovitussuoraa pitkin, vain kulkisivat x-akselin yläpuolella kohden 180 mm painuma-arvoja. Esimerkki tuo esille kuvan 39 a) mukaisen esitystavan huonon erotettavuuden ja Asaakan menetelmän oletusten virheellisyyden.

Kuvassa 40 on esitetty hyperbelimenetelmän mukainen sovitus 2 vuoden havaintojen jälkeen. Kuvaan on myös piirretty kaikkia 50 vuoden havaintoja vastaava sovituskäyrä. Sovituksia vastaava aika-painumakuvaajat on esitetty kuvassa 41 yhdessä mitattujen painumien kanssa.



Kuva 40. Keravan Kääntölava. Hyperbelimenetelmän mukainen sovitus 2 vuoden havaintojen jälkeen, sekä lopullinen 50 vuoden havaintoja vastaava sovituskäyrä.



Kuva 41. Keravan Kääntölava. Hyperbelimenetelmän mukainen sovitus aika – painuma asteikolla 2 ja 50 vuoden havaintojen perusteella.

Kuten kuvista havaitaan, saadaan hyperbelimenetelmällä hyvä sopivuus aika-painuma kuvaajalle mutta menetelmä ei ohjaa arviota hyvin vaan vaatii suuren havaintoajan. Vaikka kahden vuoden havaintojen perusteella tehty arvio on silmämääräisesti vaikuttanut hyvältä molemmissa käytetyissä koordinaatistoissa ei se kuitenkaan ole onnistunut ennustamaan tulevia painumia.

4.2.7 Naantali-Turku Mt 189

Naantali-Turku maantie 189 rakennettiin vuosina 1985 – 1989. Maaperä tiealueella on enimmäkseen joko kalliota tai pehmeää savea. Osalla savi-kosta käytettiin pohjanvahvistusmenetelmänä pystyöjitusta. Tässä raportissa käsitellään pystyöjitettua pengertä Metsäaron kohdalla paaluilla 3300 ja 3480. Raportissa käytetyt tiedot on kerätty lähteestä Vepsäläinen (1989).

Pohjasuhteet muodostuvat kolmesta eri savikerrostumasta. Ylimpänä on 2 – 3 metriä paksu pehmeä liejuinen savikerros jonka alapuolella on sulfidipitoi-nen savikerrostuma 10 - 12 metrin syvyyteen. Tämän alapuolella on lujempi ylikonsolidoitunut savikerros. Liejukerroksen vesipitoisuus on välillä 100 – 200 %, suljettu leikkauslujuus noin 5 kPa ja humuspitoisuus 5 – 15 %. Sulfi-disavikerroksen vesipitoisuus on keskimäärin 80 – 100 % välillä, suljettu leikkauslujuus kasvaa 5 kPa:sta 15 kPa:in ja humuspitoisuus on 1 – 2 %. Alimman, ylikonsolidoituneen savikerroksen vaikutusta painumiin on pysty-ojitusta suunniteltaessa pidetty merkityksettömänä.

Noin metrin paksuisen tiepenkereen päälle rakennettiin metrin paksuinen ylipenger. Ylipengerrysaika oli 2 vuotta. Ylipenkereen poistamisen yhteydessä tiepengertä kevennettiin kevytsoralla. Kevytsoran kevennysvaikutus oli noin 10 kPa.

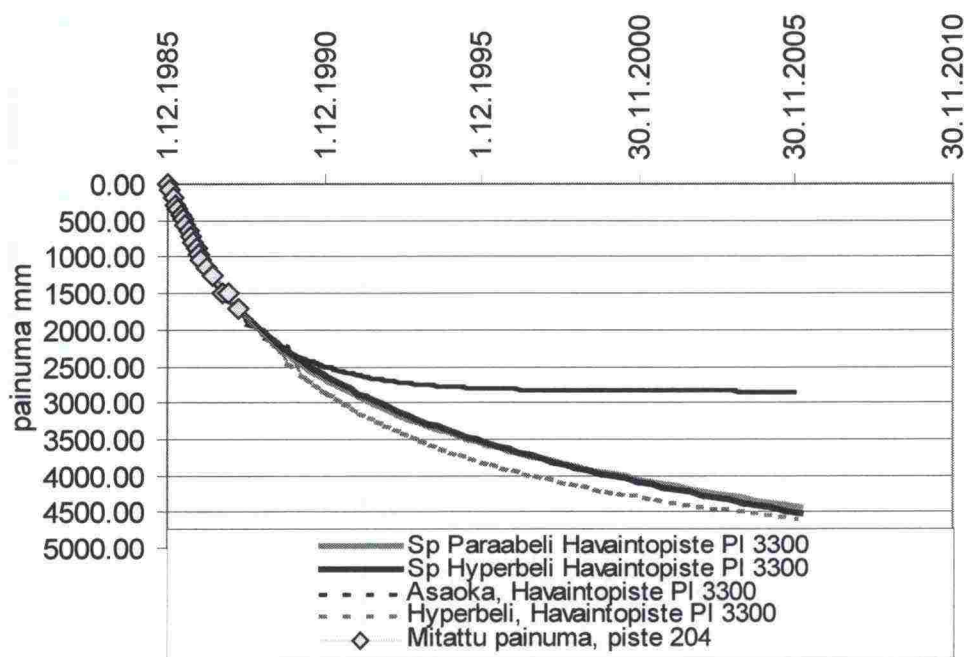
Pohjamaasta otetuille näytteille tehtiin myös runsaasti ödometrikokeita, varsinkin sulfidisavelle. JännitysekspONENTtia $\beta = 0$ vastaava moduuliluku on suuruusluokaltaan noin $m = 5$. Osasta kokeista oli määritetty myös sekundaaripainumakerroin, mutta käytettävissä olevasta aineistosta ei ilmennyt jännitysvälejä, jolta arvot oli määritetty. Suurimmat arvot, jotka todennäköisesti vastaavat normaalikonsolidoitunutta aluetta, olivat sulfidisavelle noin $C_\alpha = 0,08$. Näytteiden vesipitoisuuden ollessa 80 – 100 % on vastaava hiipumaluku noin $r_s = 100$. Liejulle ei oltu esitetty sekundaaripainumakertoimen arvoja. Olettamalla liejun hiipumaluvuksi 50 ja paksuudeksi 3 m, sekä saven hiipumaluvuksi 100 ja paksuudeksi 9 m saadaan painumapotentiaaliksi $S_p = 150$ mm. Tämä vastaa kuitenkin tilannetta ilman pystyjoja. Pystyjojen kanssa painumapotentiaalin arvo on todennäköisesti huomattavasti suurempi ensimmäisinä vuosina. Janbun esittämien tulosten mukaan sen arvo pienee selvästi kun primaarikonsolidaatio on tapahtunut. Koska myöskään yhtälön (11) mukainen ajan t_{50} määrittäminen ei päde pystyjoilla ei tässä yhteydessä esitetyillä menetelmillä pystytä arvioimaan painumapotentiaalimenetelmän parametrejä.

Havaintoajat 6 kk ja 1 v

Painumahavaintoja penkereestä on reilun 2 vuoden ajalta. Puolen vuoden ja vuoden havaintoajkoja vastaavat 2 vuoden painuma-arviot ja niitä vastaavat sovitukset on esitetty liitteessä VII. Vertailu mitattuihin painumiin on esitetty myös kuvassa 43.

Havaintoaika 2 v

Pisin käytössä oleva havaintoaika penkereestä oli 2 vuotta. Koska ylipenger poistettiin tämän jälkeen ei 2 vuoden havaintojen perusteella tehdyillä painumaennusteilla ole käytännön merkitystä. Ne antavat kuitenkin jonkinlaisen kuvan eri menetelmien sopivuudesta tälle pystyjoakohteelle. Kahden vuoden havaintoaikaa vastaavat painuma-arviot on esitetty kuvassa 42. Painumia on pyritty ennustamaan 20 v päähän penkereen rakentamisesta ilman, että ylipenkereen poistamista olisi otettu huomioon. Eri menetelmillä tehdyt 20 vuoden painuma-arviot on esitetty myös taulukossa 6.



Kuva 42. Turku-Naantali Mt 189. Eri menetelmillä tehdyt painuma-arviot 2 vuoden painumahavaintojen perusteella paalun 3300 kohdalla.

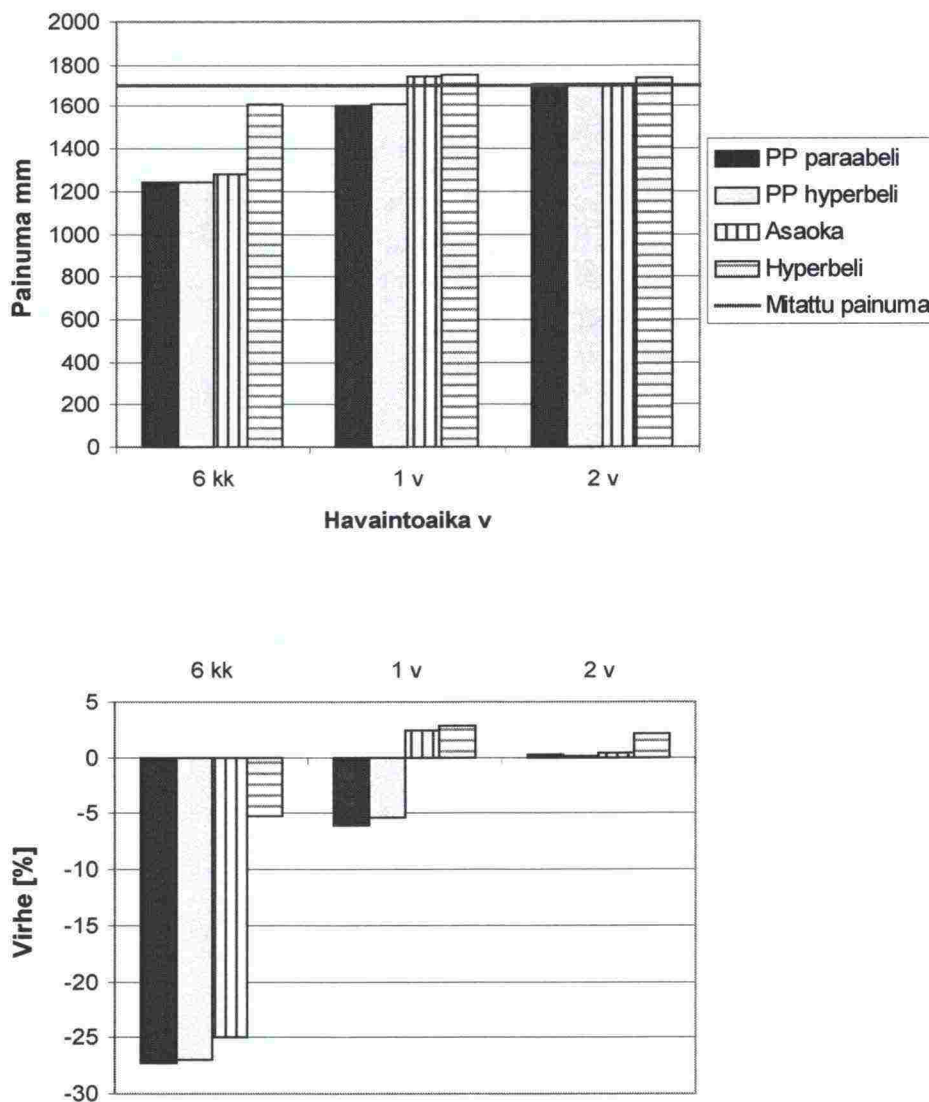
Kuvasta 42 havaitaan, että painumapotentialimenetelmä ja hyperbelimenetelmä antavat täysin epätodellisen suuruisia painumia vaikka ylipengertä ei poistettaisikaan. Painumapotentialimenetelmän osalta tämä johtuu siitä, että painumapotentialin arvoa ei ole pienennetty, vaikka on odotettavissa, että se pienenee selvästi primaarivaiheen jälkeen. Asaokan menetelmällä on saatu edellisiä selvästi pienempi, ja näin ollen myös realistisempi painuma-arvio. Kuten taulukosta 6 kuitenkin voidaan havaita, on Asaokan menetelmän arvio kuitenkin täysin satunnainen ja riippuvainen käytetystä aikavälistä ja havaintoajasta.

Taulukko 6. Turku-Naantali Mt 189. Eri menetelmillä ja ajanjaksoilla tehtyt 20 vuoden painuma-arviot paalun PI 3300 kohdalla.

Havainto aika	Painuma-arvio mm		
	0,5 v	1 v	2 v
PP Paraabeli	2772	4121	4422
PP hyperbeli	2751	4097	4499
Asaoka	1576	7247	2840
Hyperbeli	3718	4735	4596

Yhteenveto

Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 2 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat paalun 3300 kohdalla, ja niiden suhteelliset virheet on esitetty kuvassa 43.



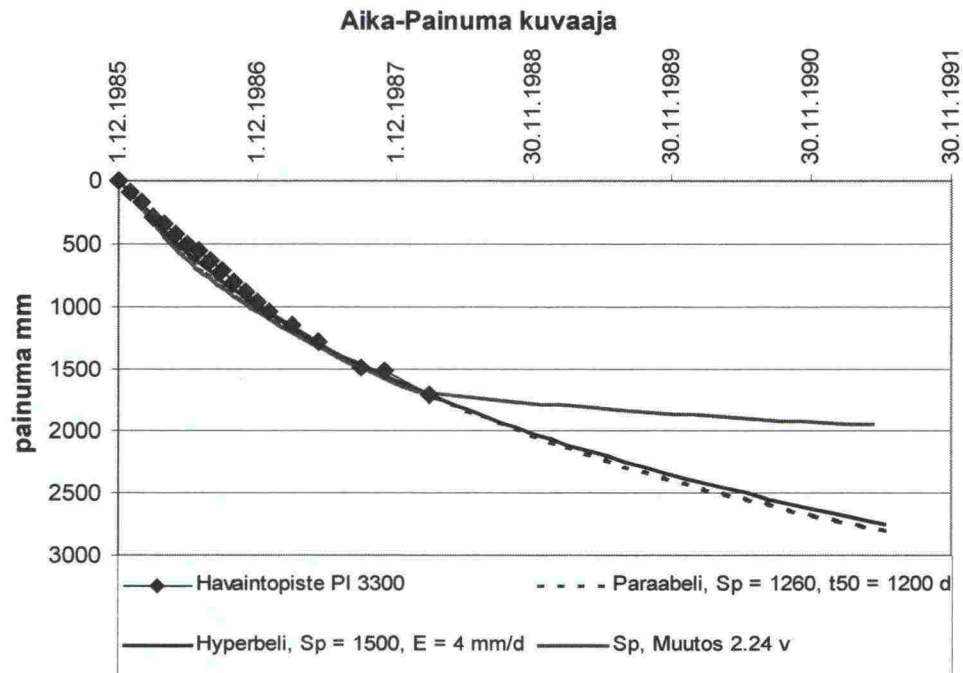
Kuva 43. Turku-Naantali Mt 189. Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 2 vuoden painuma-aikaa vastaavat paalun 3300 kohdalla, sekä niiden suhteelliset virheet.

Paras arvio kahden vuoden painumista on saatu hyperbelimenetelmällä. Tehty sovitus tarkoittaa kuitenkin samalla myös sitä, että ennusteen lopullinen painuma-arvio on aivan liian suuri. Asaokan menetelmän näennäisen hyvä tulos on satunnainen. Eri aikajakson valinnalla tulos olisi voinut poiketa huomattavasti tästä.

Huomionarvoista kohteen painumahavainnoissa on, että painumisnopeus on vakio ensimmäisen vuoden ajan, eli pengerrin on painunut vakionopeudella yhden metrin. Painumahavainnoista voidaan myös päätellä, että primaarivaihe on vielä kesken. Mikäli kuormaa olisi pidetty vakiona, olisi painumisnopeus pienentynyt selvästi huokosvedenylipaineen poistuttua. Koska ylipenger poistettiin ja pengertä vielä tämän lisäksi kevennettiin on penkereen kokonaiskuormitus pudonnut noin neljäsosaan alkuperäisestä. Tämä on luonnollisesti johtanut painumisnopeuden huomattavaan pienenemiseen. Valmiin tienpinnan lokakuussa 1988 ja elokuussa 1989 tehtyjen vaaitusten mukaan paalun 3365 10 kuukauden painuma oli 86 – 91 mm ja paalun 3245 painuma 41– 56 mm.

Painumapotentialimenetelmän avulla voidaan arvioida kevennyksen vaikutusta esimerkiksi pienentämällä painumapotentialin arvoa. Uusi arvo voidaan saada joko jatketuista painumahavainnoista, tai arvioimalla se tehdyn kevennyksen perusteella. Kuormituksen ja painumapotentialin välinen riippuvuus ei kuitenkaan ole suoraviivainen. Tämä korostuu etenkin silloin, kun penkereen varmuus sortumista vastaan on pieni. Tiepenkereen kuorma putosi kevennyksen jälkeen neljäsosaan alkuperäisestä. Tällöin painumapotentialin arvo putoaa todennäköisesti myös vähintään neljäsosaan alkuperäisestä arvostaan. Koska kyseessä on pystyjakohde pienenee sen arvo todennäköisesti yhä ajan kuluessa. Kuvassa 44 on esitetty painumaennuste olettaen, että painumapotentialin putoaa neljäsosan kevennyksen jälkeen. Teoriassa tämän vastaa maksimissaan odotettavissa olevaa painumaa. Käytettävissä olevan havaintoaineiston perusteella ei voida arvioida sen hyvyttä. Kevennyksen jälkeen ensimmäisen 10 kuukauden painumaksi on saatu 76 mm. Vaikka tulos vastaa mitattuja arvoja antaa tehty ennuste pidemmällä aikavälillä kuitenkin todennäköisesti liian suuria painumia.

Yhteenvedona voidaan todeta, että mikään käytetyistä menetelmistä ei anna kovin hyvää painuma-arviota kyseisellä pystyjakohdeella. Paras kuva ylipengerrysajan painumista saatiin hyperbelimenetelmällä. Yksittäiset tulokset paaluilta 3300 ja 3480 on esitetty liitteessä VII.



Kuva 44. Turku-Naantali Mt 189. Painumapotentialimenetelmän ennuste paalun 3300 kohdalla kevennyksellä ja ilman kevennystä.

4.2.8 Leteensuon koerakenteet

Leteensuon koerakenteet rakennettiin geovahvistetutkimuksen yhteydessä vuonna 1996. Koerakennuskohde sijaitsee Rannikon yksityistiellä Y607 Leteensuolla, Hämeenlinnasta noin 15 km luoteeseen. Koerakenteiden tarkoituksena on tutkia geovahvisteiden käyttöä kantavuuden parantamiseen ja painumien tasaamiseen rakennettaessa pehmeiden turve- ja savikerrosten varaan. Tässä raportissa käsitellään neljää eri poikkileikkausta. Kohteen kolme eri rakennetyyppiä sijoittuvat näille seuraavasti; I vertailurakenne PI 170 ja 700, II geosellirakenne pl 240 ja III 2* vahvistettu rakenne pl 650. Koerakenteiden tarkemmat tiedot löytyvät lähteestä Viatak Oy (1997). Kohteen tietoja on lisäksi kerätty lähteistä Forsman ja Lojander (1995), SCC Viatak (2000), sekä tehdyistä mittauksista.

Koerakennuskohteen pohjasuhteet muodostuvat ylimmästä keskinkertaisesti maatuneesta ja sen alapuolisesta maatuneesta turvekerroksesta joiden yhteispaksuus vaihtelee 5 ja 10 m välillä. Turpeen alapuolella on 1 – 5 m paksu savikerros jonka alapuolella on moreenikerros. Laboratoriokokeiden perusteella (Forsman ja Lojander 1995) turpeen tuhkapitoisuus on pääosin 5 - 15 % ja vesipitoisuus 500 – 1000 % pintakerroksen alapuolella. Syvyydellä 0 - 1 m olevan keskinkertaisesti maatuneen turpeen vesipitoisuus on välillä 300 - 500 %. Turpeen alapuolisten savi- ja savisten silttikerrosten vesipitoisuus vaihtelee paljon, ollen pääosin välillä 40 – 90 %.

Näytteille oli tehty myös runsaasti ödometrikokeita. Ödometrikokeista määritetty turpeen moduuliluku oli keskimäärin välillä $m = 3 - 5$ ja vastaava jännitysekspONENTTI $\beta = 0,3 - 0,5$. Sekundaaripainumakertoimen arvo oli keskimääräiseltä suuruusluokaltaan noin $C_{\alpha\epsilon} = 1$. Tätä vastaava hiipumaluku on $r_s = 230$, mitä voidaan pitää huomattavan suurena arvona. Maalajin ja sen ominaisuuksien (vesipitoisuus ja arvioitu muodonmuutosnopeusparametri B) perusteella todennäköinen hiipumaluku olisi ennemmin $r_s = 40 - 60$. Paalulla PI 240 turvekerrosten paksuus on noin 7,7 m. Alapuolisen savikerroksen vaikutus painumapotentiaalin arvoon on verrattain pieni, jolloin painumapotentiaali on arviolta $S_p = 130 - 200$ mm. Portaittaisten ödometrikokeiden perusteella määritetyt konsolidaatiokertoimen arvot vaihtelevat turpeella verrattain paljon, mutta ovat keskimäärin hyvin suuria, suuruusluokaltaan noin $c_v = 30$ m²/a. Tutkimusraportissa (Forsman ja Lojander 1995) mukana olleen yhden CRS ödometrikokeen perusteella arvot ovat kuitenkin selvästi pienempiä sen jälkeen kun näytteen huokosvedenpaine on reagoinut kuormitukseen. Tämä alue on ainakin CRS kokeen osalta todellisin, koska näytteet olivat vain osittain kyllästyneitä. Koska tulosten hajonta ja epävarmuus on näin suuri ei aikaa t_{50} määritetty konsolidaatiokertoimen avulla.

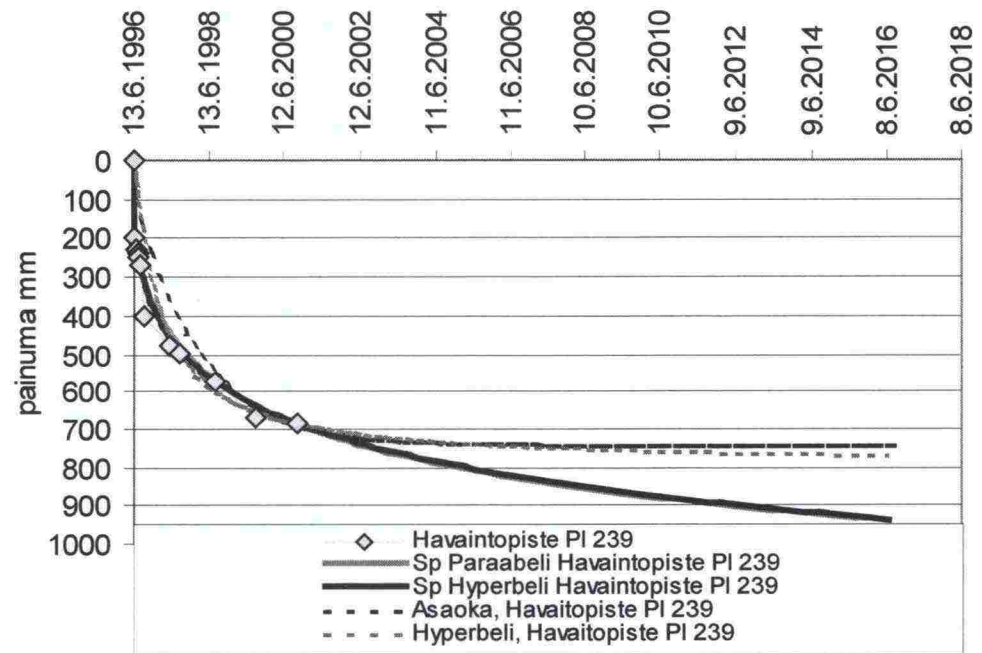
Koerakenteiden kokonaispainumaa on mitattu sekä painumalevyjen että painumaletkujen avulla. Koska kesän 2000 mittaukset tielinjan keskiosalla tehtiin ainoastaan painumaletkujen avulla käytetään tässä raportissa näitä mittauksia. Kohteen painumaletkujen ja -levyjen tulosten on havaittu vastaavan hyvin toisiaan.

Havaintoajat 1 ja 2 v

Painumahavaintoja penkereestä on 4 vuoden ajalta. Vuoden ja kahden vuoden havaintoajoja vastaavat 4 vuoden painuma-arviot ja niitä vastaavat sovitukset on esitetty liitteessä VIII. Vertailu mitattuihin painumiin on esitetty myös kuvassa 46.

Havaintoaika 4 v

Pisin käytössä oleva havaintoaika Leteensuon koetiestä oli 4 vuotta. Tätä vastaavat painuma-arviot on esitetty kuvassa 45. Painumia on pyritty ennustamaan 20 v päähän penkereen rakentamisesta. Eri menetelmillä tehdyt 20 vuoden painuma-arviot on myös esitetty taulukossa 7.



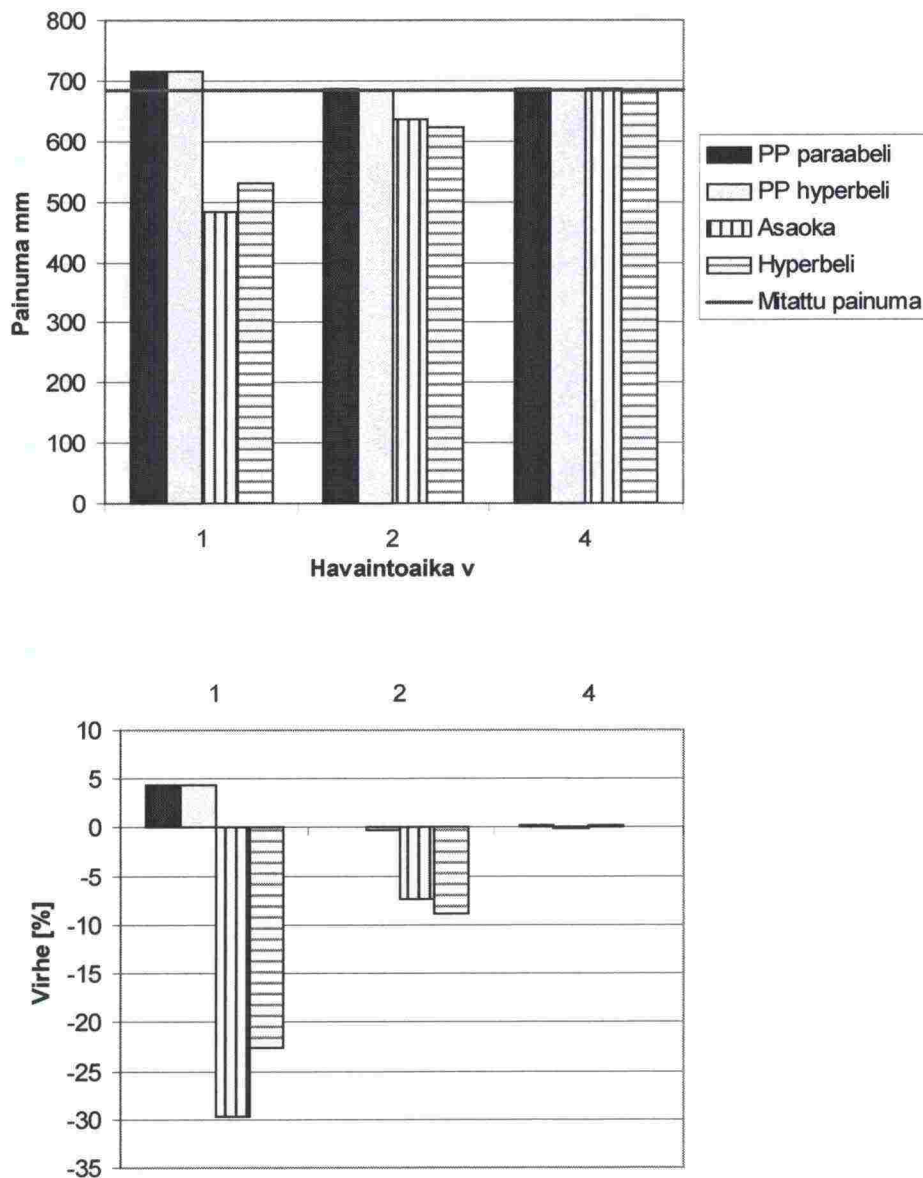
Kuva 45. Leteensuon koetie. Eri menetelmillä tehdyt painuma-arviot 4 vuoden painumahavaintojen perusteella koerakenteen paalun PI 239 keskilinjalla.

Taulukko 7. Leteensuon koetie. Eri menetelmillä ja ajanjaksoilla tehdyt 20 vuoden painuma-arviot perusteella koerakenteen paalun PI 239 keskilinjalla.

Havaintoaika	Painuma-arvio mm		
	1 v	2 v	4 v
PP Paraabeli	984	938	939
PP hyperbeli	984	937	937
Asaoka	482	648	745
Hyperbeli	543	673	772

Yhteenveto

Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 4 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat paalun PI 239 keskilinjalla, ja niiden suhteelliset virheet on esitetty kuvassa 46.



Kuva 46. Leteensuon koetie. Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 4 vuoden painuma-aikaa vastaavat painuma koerakenteen paalun PI 239 keskilinjalla, sekä niiden suhteelliset virheet.

Painumapotentialimenetelmällä saatiin hyvä arvio neljän vuoden painumasta jo yhden vuoden havaintoajan jälkeen. Asaokan menetelmä ja hyperbelimenetelmä vaativat sitä vastoin vähintään kahden vuoden havainnot.

Ödometrikokeista määritetty hiipumaluku oli odotetusti aivan liian suuri. Hiipumaluvun kenttäarvoksi saatiin $r_s = 46$, mikä maalajin ja vesipitoisuuden perusteella vastasi odotettua. Konsolidaatiokertoimen kenttäarvoksi saatiin $c_{vk} = 3,9 \text{ m}^2/\text{a}$ mikä on huomattavasti pienempi kuin portaittaisista ödometrikokeista määritetyt.

Yksittäiset tulokset paaluilta 170, 240, 650 ja 700 on esitetty liitteessä VIII.

4.2.9 Vanhankaupungin lahti

Tässä raportissa käsitellään Vanhankaupungin lahden (Arabianranta) osalta osa-alueen II täyttöä. Alueelle rakennettiin vuonna 1983 kelluva rantapenger. Penger muodostuu suurimmilta osin kahdesta yhdensuuntaisesta vahvistetusta louhepenkereestä joiden väliin tehtiin täyttö kitkamaista. Louhepenkereiden välimatka on 50 m.

Täyttöalue sijaitsi vesialueella, jossa maanpinta vaihteli reunapenkereen osalla välillä $-1,9$ - $-1,1$. Ylimpänä kerroksena on savinen liejukerros, jonka paksuus on enimmillään noin 10 – 12 m. Liejukerroksen siipikairalla mitattu leikkauslujuus vaihteli rajoissa 3 – 25 kPa ja vesipitoisuus välillä 50 – 125 %. Liejukerroksen alapuolella on savikerros, jonka leikkauslujuus on välillä 9 – 33 ja vesipitoisuus välillä 50 – 100 %. Savikerroksen alapuolella on siltti- ja silttimoreenikerrokset.

Alueella on tehty runsaasti valvontamittauksia. Tässä raportissa käsitellään seuraavia painumamittauspisteitä; 2908/110, 2908/111, 2908/112, 2908/122, 2908/204 ja 2908/301.

Penger rakennettiin talvella jään päälle. Tästä ja hyvin pehmeästä ylimmästä liejukerroksesta johtuen on penger painunut ensimmäisen vajaan vuoden aikana hyvin paljon. Tämä, noin metrin suuruinen painuma on painumapotentiaalin menetelmässä käsitelty kokonaisuudessaan alkupainumana.

Liejukerroksen vesipitoisuus on keskimäärin noin 100 %. Tietäen, että alueen varmuus on alhainen voidaan kuvan 4 perusteella arvioida, että hiipumaluku on luokkaa $r_s = 40 - 50$. Vastaavaan suuruusluokkaan päästään olettamalla jännityseksponenttia $\beta = 0$ vastaavaksi moduuliluvuksi $m = 4 - 5$ ja muodonmuutosnopeusparametriksi $B = 0,08 - 0,09$. Alemman savikerroksen kesimääräinen vesipitoisuus on luokkaa 80 %. Tässä kerroksessa humuspitoisuus on pienempi ja hiipumaluvun voidaan arvioida oleva välillä $r_s = 70 - 90$. Olettamalla jännityseksponenttia $\beta = 0$ vastaavaksi moduuliluvuksi $m = 6$ ja muodonmuutosnopeusparametriksi $B = 0,07$ saadaan hiipumaluvuksi $r_s = 85$. Olettamalla liejukerroksen hiipumaluvuksi $r_s = 45$ ja savikerroksen hiipumaluvuksi $r_s = 80$, sekä molempien kerrosten paksuudeksi keskimäärin 10 m saadaan painumapotentiaaliksi noin $S_p = 350$ mm.

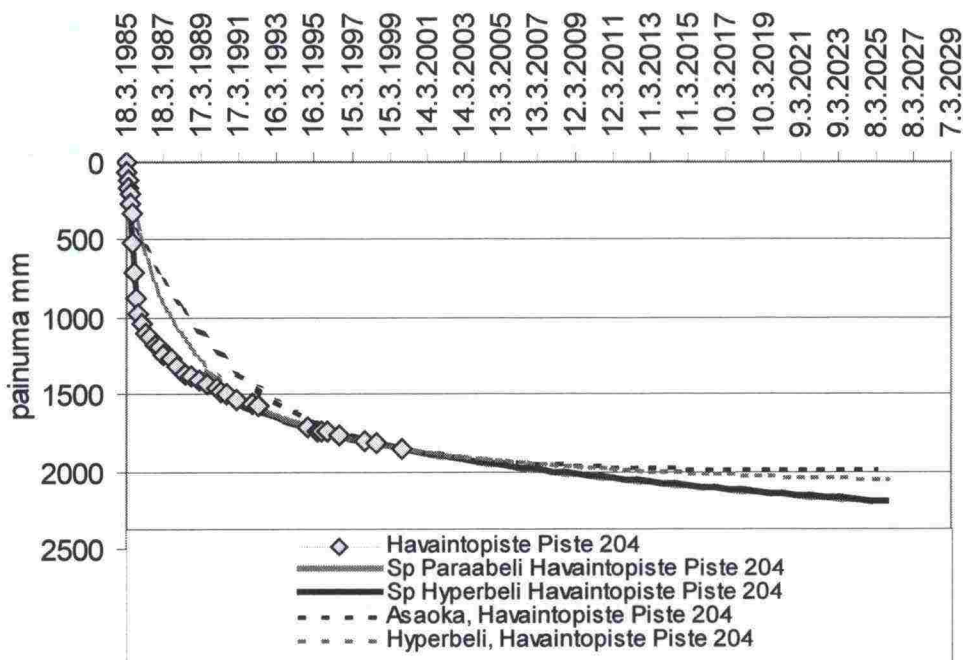
Havaintoajat 2 – 7 v

Painumahavaintoja Vanhankaupungin lahdelta on 15 vuoden ajalta. Kuten edellä jo mainittiin, on painuminen ollut varsin suurta ensimmäisen vajaan vuoden aikana. Piste 2908/204 painui ensimmäisen 8 kuukauden aikana noin metrin. Muissa havaintopisteissä käyttäytyminen on ollut hyvin saman-

kaltaista. Tämä nopea painuminen poikkeaa selvästi sitä seuraavasta hitaammasta painumisesta. Ensimmäinen painuma-arvio on tämän vuoksi tehty kahden vuoden havaintojen jälkeen, minkä lisäksi arviot laadittiin 4, 7 ja 15 vuoden havaintojen jälkeen. Painuma-arviot ja niitä vastaavat sovitukset on esitetty liitteessä IX. Vertailu mitattuihin painumiin on esitetty myös kuvassa 48. Tekstin yhteydessä esitetyt painumat edustavat mittauspistettä 2908/204.

Havaintoaika 15 v

15 vuoden painumahavaintoihin perustuvat painuma-arviot on esitetty kuvassa 47. Painumia on pyritty nyt arvioimaan 40 vuoden päähän rakentamisesta. 40 vuoden painuma-arviot on esitetty myös taulukossa 8. Eri menetelmien erot ovat nyt verrattain vähäiset, maksimissaan 10 %.



Kuva 47. Vanhankaupunginlahti. Eri menetelmillä tehdyt painuma-arviot 15 vuoden painumahavaintojen perusteella Vanhankaupunginlahden mittauspisteessä 2908/204.

Taulukko 8. 15 vuoden havaintojen perusteella tehdyt 40 vuoden painuma-arviot mittauspisteessä 2908/204.

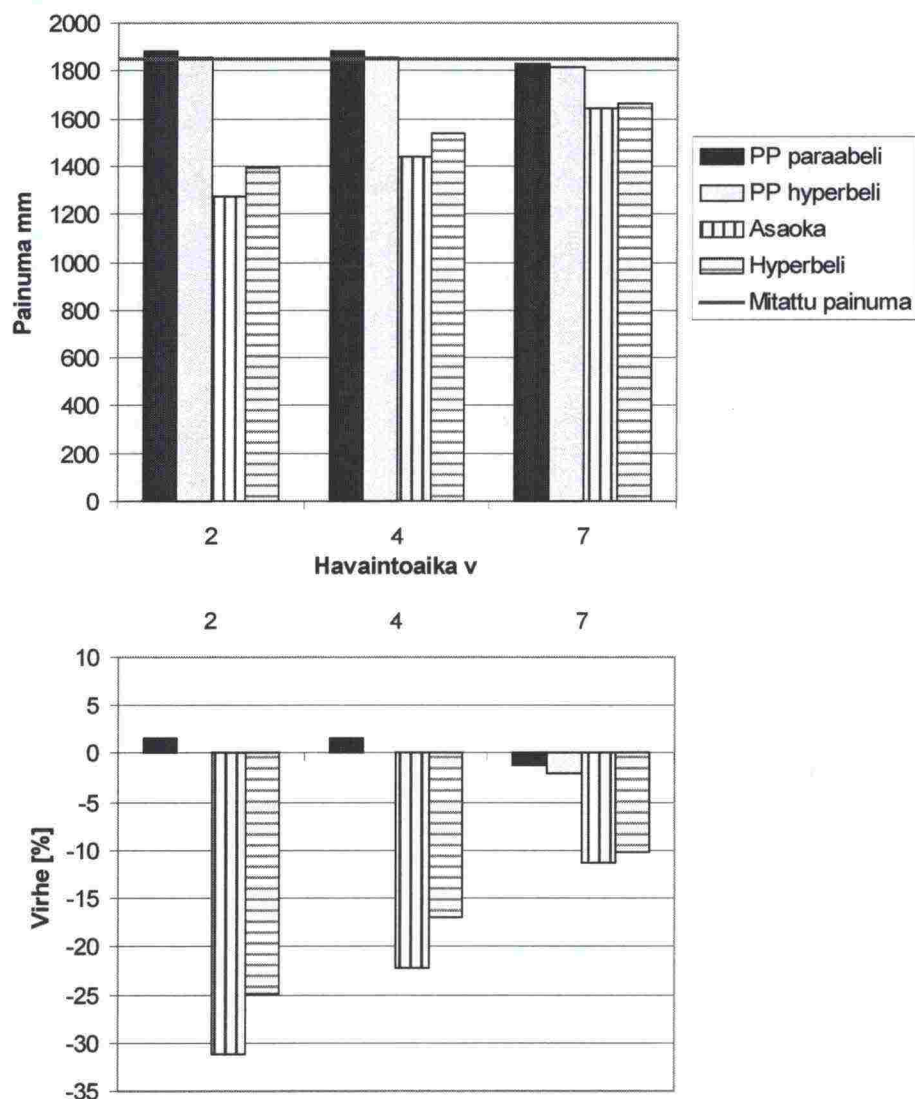
	40 vuoden painuma-arvio mm
PP Paraabeli	2194
PP hyperbeli	2193
Asaoka	1996
Hyperbeli	2055

Yhteenveto

Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 15 vuoden painuma-aikaa vastaavat painuma-arviot on esitetty kuvassa 48. Painumapotentialimenetelmällä on saatu erittäin hyvä arvio jo kahden vuoden havaintojen perusteella. Neljän vuoden havaintojen perusteella arvio on pysynyt muuttumattomana mutta seitsemän vuoden havaintojen perusteella arvio on muuttunut hieman pienemmäksi. Syynä tähän on pienempi painumisnopeus neljän ja seitsemän vuoden välillä, jonka jälkeen painumisnopeus on jälleen hieman kasvanut.

Asaokan menetelmä ja hyperbelimenetelmä ovat jälleen aliarvioineet painumia ja vaatineet kohtalaisen pitkän havaintoajan ennen kuin arvio on tarkentunut.

Lähtötietojen perusteella arvioitu painumapotentialin arvo on pitänyt hyvin paikkaansa kenttäarvon ollessa $S_p = 340 \dots 350$ mm. Keskimääräiseksi hii-pumaluvun arvoksi saatiin tulosten perusteella $r_s = 58$.



Kuva 48. Vanhankaupunginlahti. Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 15 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat Vanhankaupunginlahden mitauspisteessä 2908/204, sekä niiden suhteelliset virheet.

4.2.10 Itäkeskuksen päiväkot

Itäkeskuksen III päiväkot rakennettiin vuonna 1980. Pohjasuhteet muodostuvat ohuesta kuivakuorikerroksesta, jonka alapuolella on noin 5,5 – 6 m paksu savikerros. Savikerroksen suljettu leikkauslujuus vaihtelee rajoissa 8 – 16 kPa ja vesipitoisuus välillä 50 – 120 % ollen keskimäärin noin 80 %. Savikerroksen alapuolella on siltti-, hiekka- ja hiekkamoreenikerrokset.

Pehmeästä savikerroksesta johtuen pohjamaata vahvistettiin halkaisijaltaan 500 mm kalkkipilareilla. Syvästabilointi ei kuitenkaan täysin onnistunut sillä päiväkot painuu edelleen.

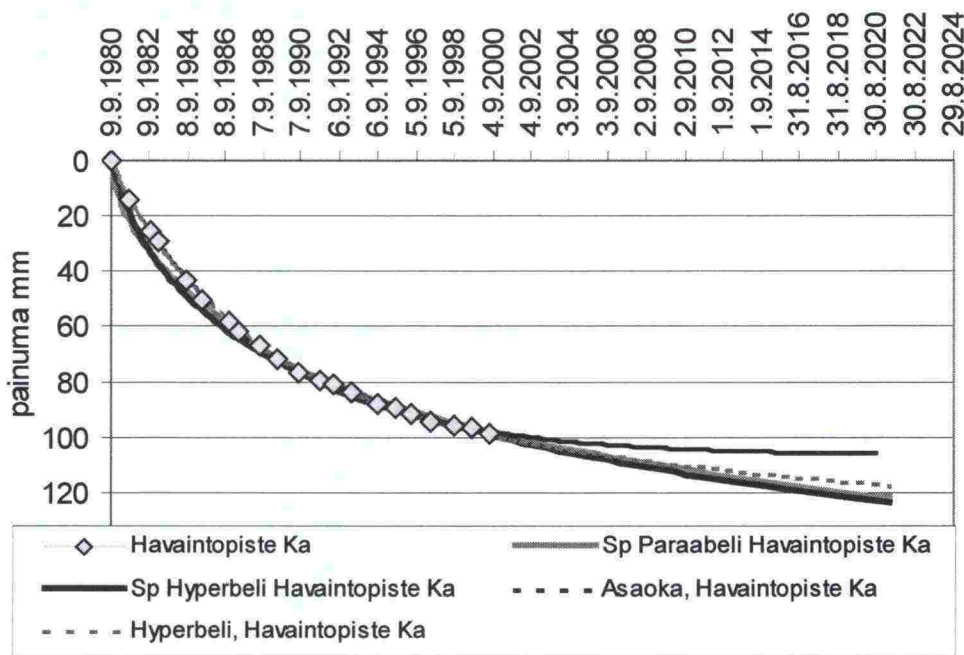
Lähtötietoja on verraten niukasti jotta painumapotentiaalimenetelmän parametrejä voisi hyvin arvioida etukäteen. Vesipitoisuuden perusteella voisi hiipumaluvun olettaa olevan luokkaa $r_s = 100$. Vaikka stabilointi ei ole täysin onnistunut on se kuitenkin parantanut maan ominaisuuksia. Tämän perusteella hiipumalukua 100 vastaava painumapotentiaalia $S_p = 60$ mm voidaan pitää ylärajana.

Havaintoajat 2,5 – 8 v

Painumahavaintoja Itäkeskuksen päiväkodista on 20 vuoden ajalta. Mittauksia on tehty keskimäärin yhden vuoden välein, mukaan lukien ensimmäinen mittausta. Tästä johtuen ei lyhyemmän kuin 2,5 v havaintoajan mukaisia painuma-arvioita ole pystytty tekemään. Painuma-arviot tehtiin 2,5 5, 8 ja 20 vuoden mittausten mukaisille painumahavainnoille. 2,5, 5 ja 8 vuoden havaintoajoja vastaavat painuma-arviot ja niitä vastaavat sovitukset on esitetty liitteessä X. Vertailu mitattuihin painumiin on esitetty myös kuvassa 50. Esitetyt painumat edustavat mittauspisteiden 1,2,3,4 ja 6 keskiarvoa.

Havainto aika 20 v

20 vuoden painumahavaintoihin perustuvat painuma-arviot on esitetty kuvassa 49. Painumia on pyritty nyt arvioimaan 40 vuoden päähän rakentamisesta. 40 vuoden painuma-arviot on esitetty myös taulukossa 9.



Kuva 49. Itäkeskuksen päiväkoti. Eri menetelmillä tehty painuma-arviot 20 vuoden painumahavaintojen perusteella.

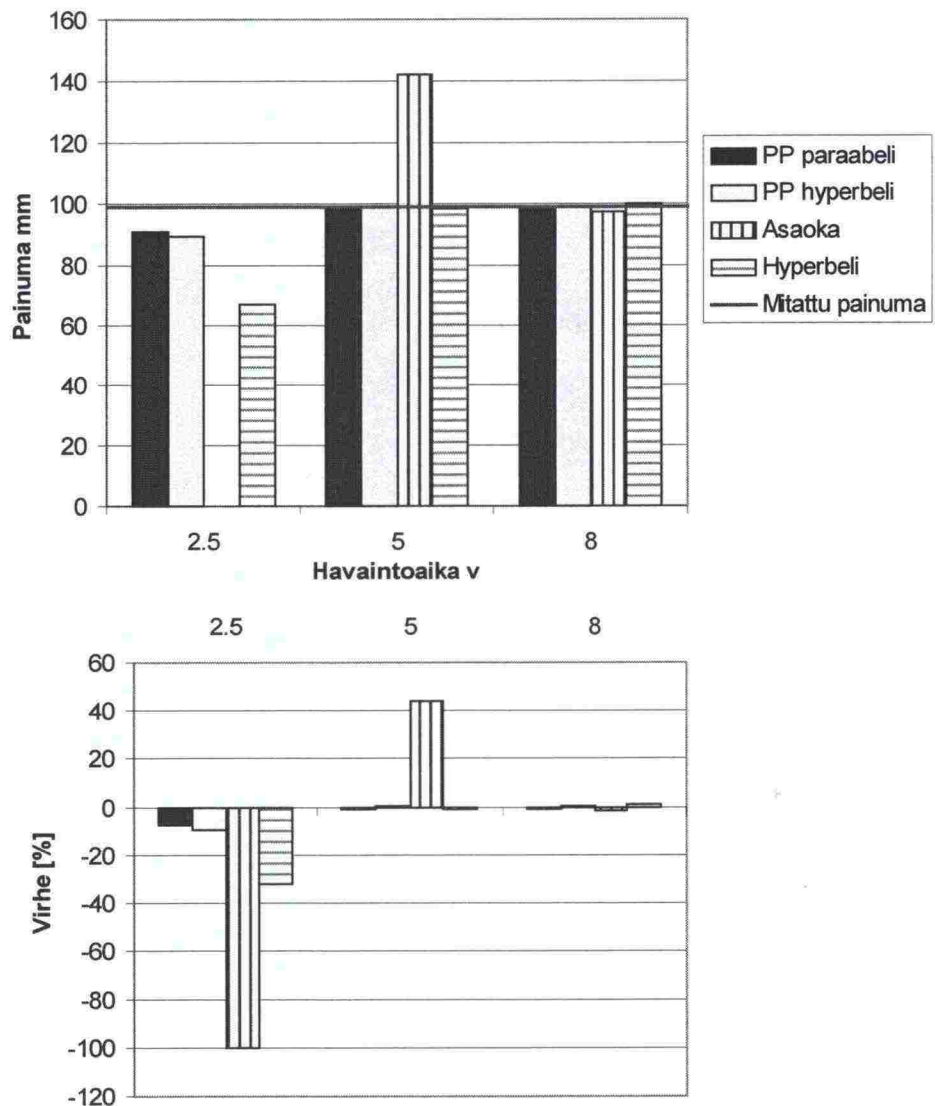
Taulukko 9. 20 vuoden havaintojen perusteella tehdyt 40 vuoden painuma-arviot.

	40 vuoden painuma-arvio mm
PP Paraabeli	121
PP hyperbeli	123
Asaoka	106
Hyperbeli	117

Yhteenveto

Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 20 vuoden painuma-aikaa vastaavat painuma-arviot on esitetty kuvassa 50. Asaokan menetelmällä ei pystytty tekemään painuma-arviota 2,5 vuoden havaintojen perusteella koska käytetty aikaväli vaikutti mielivaltaisesti arvioon ilman, että sen hyvyttä olisi voinut arvioida. Myöskään 5 vuoden havaintojen perusteella ei Asaokan menetelmällä ole saatu kovin hyvää painuma-arviota. Muilla menetelmillä on sitä vastoin saatu erittäin hyvät painuma-arviot 5 vuoden havaintojen perusteella ja osin melko hyvät arviot jo 2,5 vuoden havaintojen perusteella.

Painumapotentiaalin arvoksi saatiin $S_p = 35$ mm, mikä odotetusti oli pienempi kun pelkän saven ominaisuuksien perusteella arvioitu. Hiipumaluvun kenttäarvo on tämän perusteella noin $r_s = 170$ ja sitä vastaava muodonmuutosnopeusparametri $B = 0,047$. Konsolidaatiokertoimen kenttäarvoksi saatiin $c_{vk} = 0,3 \text{ m}^2/\text{a}$.



Kuva 50. Itäkeskuksen päiväkotii. Eri ajanjaksoina ja eri menetelmillä lasketut, 20 vuoden painuma-aikaa vastaavat painumat, sekä niiden suhteelliset virheet.

4.2.11 Pikku-Huopalahti 1, Tilkan kaava-alue

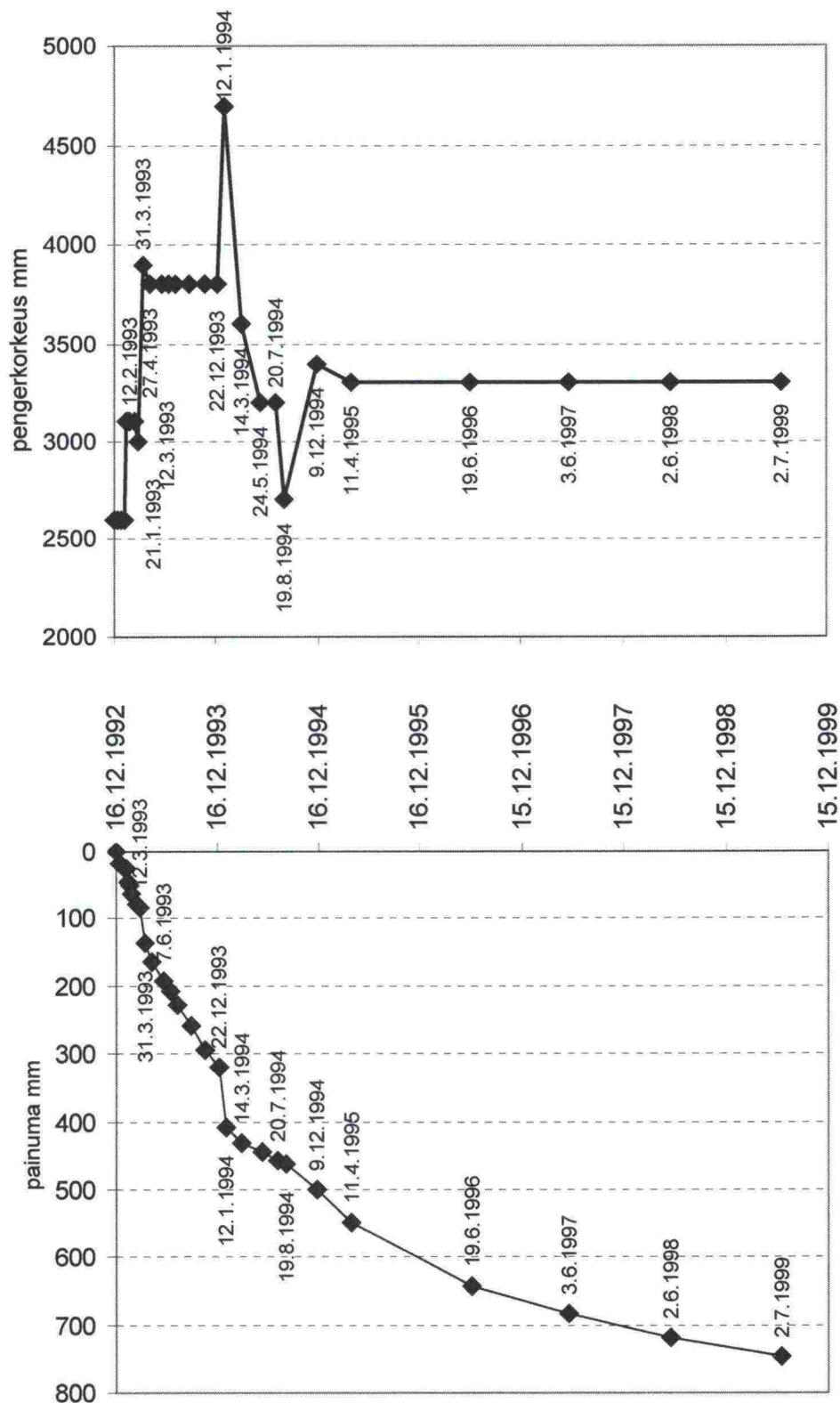
Pikku-Huopalahti sijaitsee neljän kilometrin päässä Helsingin keskustasta, Mannerheimintien, Vihdintien, Huopalahdentien ja Paciuksenkadun välisellä alueella. Alueen maaperä koostuu hyvin pehmeistä savi- ja liejunkerroksista mistä johtuen aluetta on aiemmin käytetty lähinnä varasto- ja maantäyttöalueena. Ranta-alueiden täyttöä on tapahtunut 40-luvulta lähtien ja laajemmassa mittakaavassa 50-luvun alkupuolelta lähtien. Alueen kaavoitus aloitettiin 1980-luvun alussa johtuen lähinnä alueen hyvästä sijainnista ja hyvän rakennuspohjan puutteesta. Tässä raportissa käytetty aineisto on saatu alueella tehdyistä painumahavainnoista ja pohjatutkimuksista, sekä lähteestä Yrjänä ja Korhonen (1991).

Vanhojen täyttöjen paksuudet vaihtelevat alueella paljon. Täyttöjen ja/tai kuivakuorikerroksen alapuolella on muutaman metrin paksuinen lieju tai liejusavikerros jonka alla on savikerros. Savikerroksen paksuus on lahden reunamilla noin 20 metriä. Liejuisen savikerroksen vesipitoisuus vaihtelee välillä 100 – 160 % ja siipikairalla mitattu leikkauslujuus välillä 5 – 25 kPa. Savikerroksen vesipitoisuus on välillä 60 – 120 % ja suljettu leikkauslujuus 8 – 20 kPa. Savikerroksen alapuolella on vielä siltti- ja hiekkakerroksia, jotka syvemmällä muuttuvat moreeniksi. Alueen esirakentaminen aloitettiin 80-luvun puolivälissä. Tässä raportissa tarkasteltavat alueet, Tilkan kaava-alueen syvästabilointi sekä Korppaanmäentien pystyöjitus aloitettiin vuosina 1992 ja 1990. Esirakentamisena alkaessa täytöt olivat edelleen painumistilassa, eli savikerrokset eivät olleet vielä täysin konsolidoituneet yllä olevan täytön aiheuttamalle kuormalle.

Tilkan kaava-alueen syvästabilointikohteesta tarkastellaan tässä raportissa painumahavaintopisteitä 4459/307, 4459/310, 4459/312, 4459/214, 4459/320 ja 4459/328. Esimerkinomaisesti tarkastellaan pistettä 4459/313, muut pisteet löytyvä liitteestä XI. Kokonaisuudessaan syvästabiloinnin onnistumista voidaan pitää heikohkona, sillä painumat ovat olleet 50 - 1200 mm välillä.

Havaintoaika 4,5 v

Syvästabiloinnin ohella alueen tekee poikkeavaksi se, että penkereestä aiheutuva kuormitus ei ole vakio. Kuvassa 51 on esitetty pengerkorkeus ja painuma pisteen 4459/313 kohdalla. Kuvasta ilmenee pengerkorkeuden ja painumisen välinen hyvin selkeä riippuvuus.



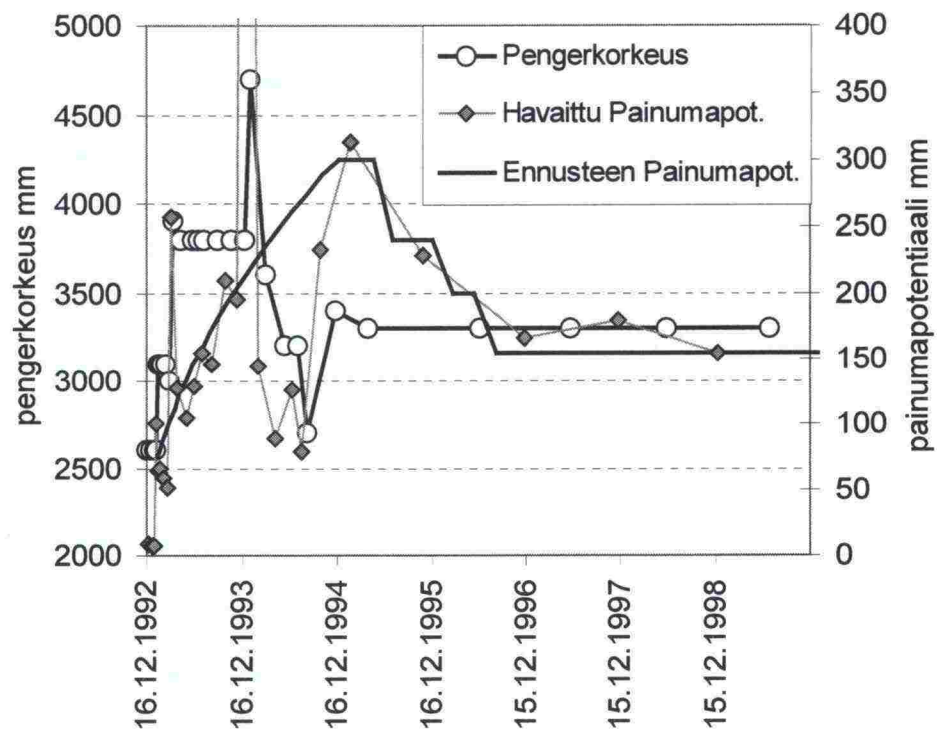
Kuva 51. Pikku-Huopalahti, Piste 4459/313. Pengerkorkeus ja painuma ajan funktiona.

Koska olosuhteet eivät ole vakiot ei ole todenmukaista vertailla lyhyen ajan painumahavainnoista tehtyjä viimeisen mittausajankohdan painumaennusteita mitattuun painumaan. Käytetyistä menetelmistä ainoastaan painumapotentiaalimenetelmällä voidaan periaatteessa ottaa muuttuvat kuormitusolosuhteet huomioon. Painuma-arviot tehdään tämän vuoksi ensimmäisen kerran vasta 4,5 vuoden havaintoajan jälkeen, jolloin kuormitus on vakio. Koska havaintoja on ainoastaan 6,5 vuoden ajalta osuvat kaikki menetelmät melko oikeaan. Painumapotentiaalimenetelmän arvio on 747 mm, Asaokan 731 mm ja hyperbelimenetelmän 744 mm, mitatun painuman ollessa 746 mm. Painumapotentiaalimenetelmän arviossa painumapotentiaalin arvoa on pienennetty havaitun painumapotentiaalin arvon mukaisesti. Menetelmä on esitetty tarkemmin 6,5 vuoden havaintoihin perustuvien arvioiden yhteydessä. Yksittäiset tulokset on esitetty liitteessä XI.

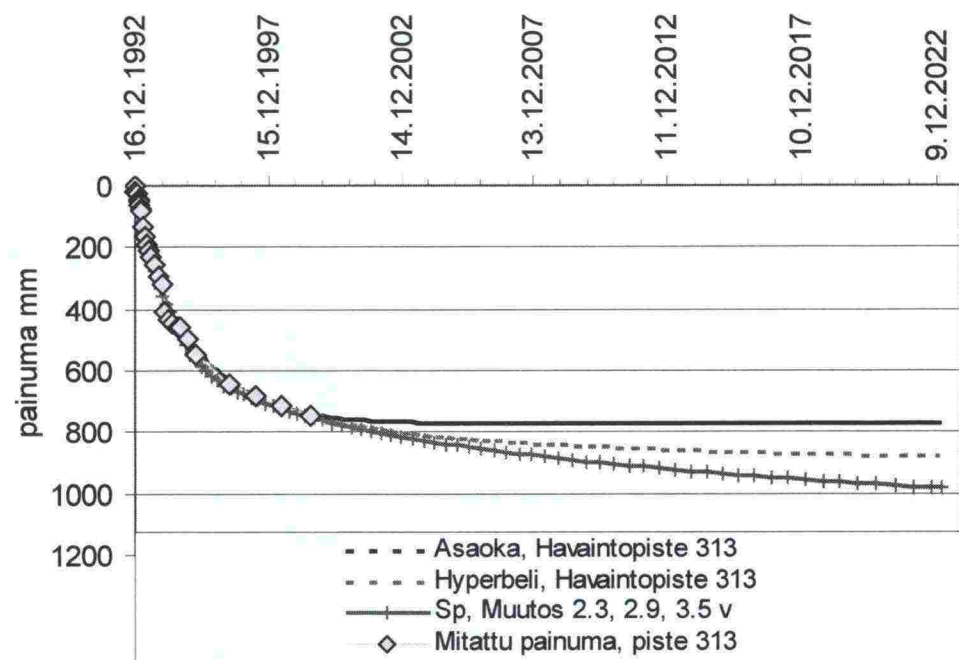
Havaintoaika 6,5 v

Kuvassa 52 on esitetty pengerkorkeus ja painumapotentiaali ajan funktiona. Kuten odotettavissa on seuraa painumapotentiaalin muutos hyvin selkeästi pengerkorkeuden muutosta. Vakio painumapotentiaalin arvolla ei näin ollen ole todenmukaista arvioida painumia, kun pengerkorkeus muuttuu. Pengerkorkeuden ja painumapotentiaalin välinen riippuvuus ei kuitenkaan ole suoraviivainen. Niiden välille voi myös olla vaikea löytää yksinkertaista ja yleistä riippuvuutta, koska siihen maalajiominaisuuksien lisäksi vaikuttaa mm. alueen stabiliteetti. Painumaennustetta tehtäessä tulee painumapotentiaalin arvo mahdollisimman pitkälle perustua havaittuihin arvoihin. Seuraavassa on oletettu, että pengerkorkeus pysyy vuoden 1995 tasolla. Painumaennusteet on tehty 30 vuoden päähän rakentamisesta. Asaokan menetelmässä ja hyperbelimenetelmässä alkuvaiheen muuttuvan pengerkorkeuden vaikutus on otettu huomioon ottamalla sovitukseen ainoastaan jälkimmäiset painumahavainnot. Painumapotentiaalimenetelmässä käytetty painumapotentiaalin arvo on esitetty kuvassa 52. Alkuosalla on käytetty paraabelisovitusta, minkä jälkeen arvoa on pienennetty kolmena eri ajankohtana. Painumaennusteessa on oletettu, että olosuhteet/painumapotentiaalin arvo ei enää tämän jälkeen muutu. Tehdyt 30 vuoden painuma-arviot on esitetty kuvassa 53.

30 vuoden painuma-arvio on painumapotentiaalimenetelmällä 984 mm, Asaokan menetelmällä 775 mm ja hyperbelimenetelmällä 883 mm.



Kuva 52. Pikku-Huopalahti, Piste 4459/313. Pengerkorkeus ja painumapotentialiaali ajan funktiona.



Kuva 53. Pikku-Huopalahti, Piste 4459/313. Eri menetelmin tehdyt 30 vuoden painumaennusteet.

4.2.12 Pikku-Huopalahti 2, Korppaanmäentie

Toisena Pikku-Huopalahden alueena käsitellään Korppaanmäentien pysty-
ojitusta. Tässä raportissa käsitellään painumahavaintopisteitä 3674/4A,
3674/5A ja 3674/8A. Pisteiden 3674/5A havaintoja käsitellään esimerkinomai-
sesti ja muut pisteet löytyvät liitteestä XII. Myös Korppaanmäentien alueella
on pengerkorkeus vaihdellut vuosien aikana. Pisteiden 3674/5A tekee mielen-
kiintoiseksi se, että pengerkorkeus on kasvanut noin puolella metrillä mikä
näkyi myös selvästi painumahavainnoissa.

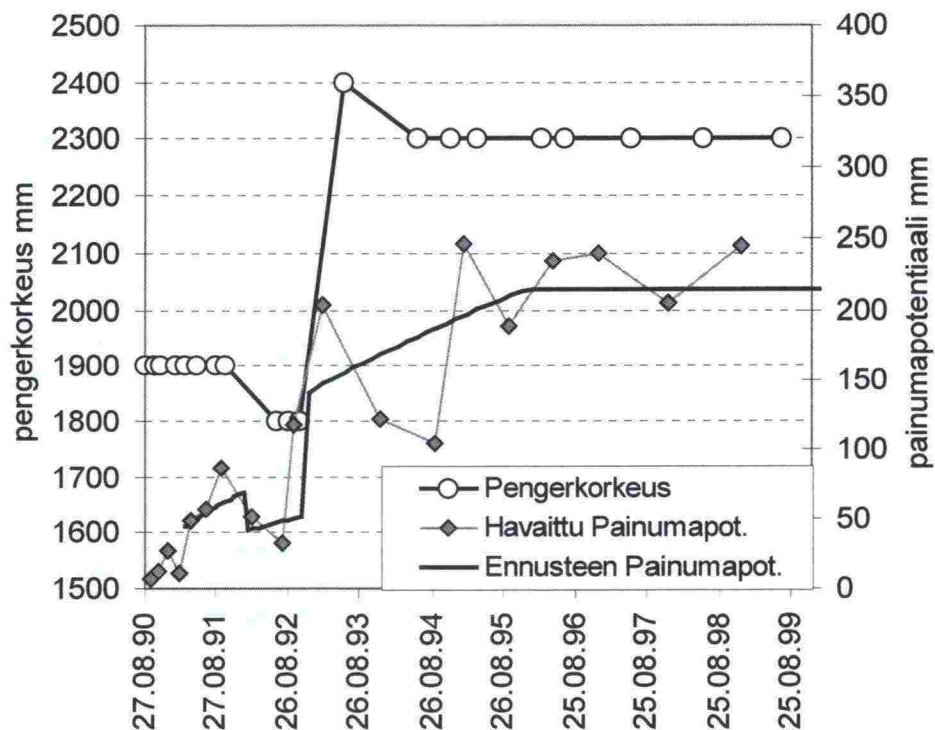
Havaintoaika 5 v

Koska olosuhteet eivät ole olleet koko ajan vakiot, on painumaennuste tehty
vasta vajaan 5 vuoden havaintoajan jälkeen. Käytettävissä oleva kokonais-
havaintoaika oli hieman vajaa yhdeksän vuotta. Tätä vastaavaksi painumak-
si saatiin painumapotentialimenetelmällä 375 mm, Asaokan menetelmällä
363 mm ja hyperbelimenetelmällä 327 mm. Havaittu painuma oli 380 mm.
Asaokan menetelmän ja hyperbelimenetelmän tulokset olivat hyvin riippuvai-
sia mistä ajankohdasta lähtien sovitusta tehtiin.

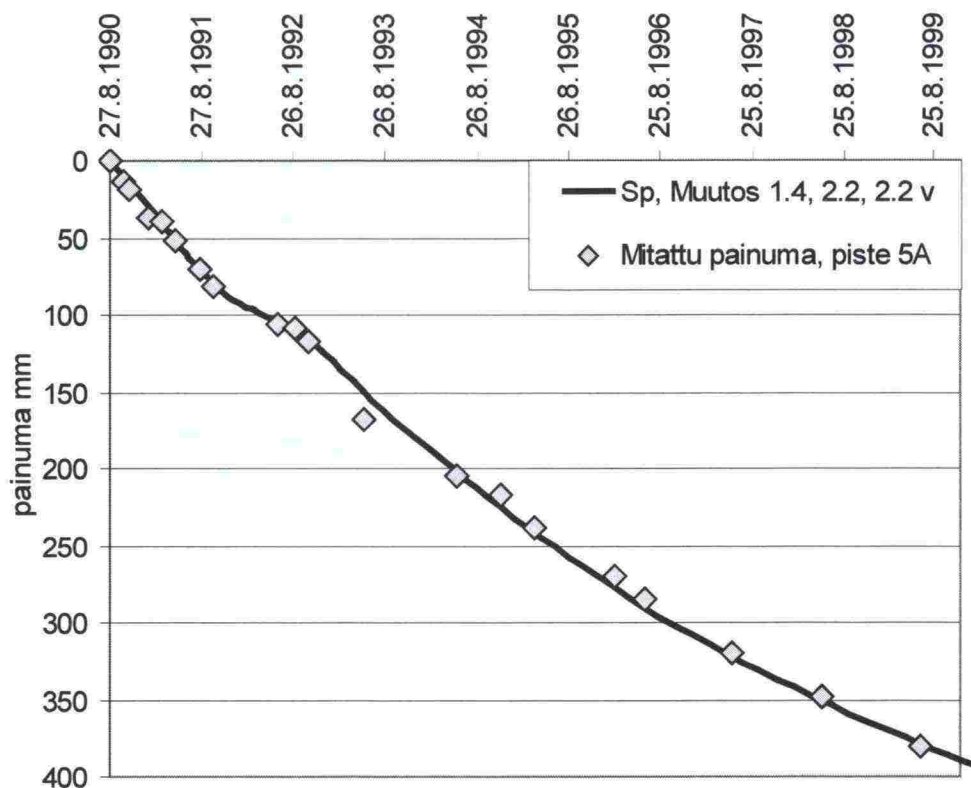
Havaintoaika 9 v

Kuvassa 54 on esitetty pengerkorkeus ja painumapotentialiaali ajan funktiona.
Vaikka pengerkorkeuden muutokset ovat olleet pieniä on painumapotentialiaa-
lin muutos selkeästi seurannut sitä. Kuvassa on esitetty myös sovituksessa
käytetty painumapotentialiaalin arvo. Tätä vastaava aika-painumakäyrä on
esitetty kuvassa 55 yhdessä havaintojen kanssa. Kuten kuvasta nähdään
voidaan painumapotentialialimenetelmällä seurata tarkkaan muuttuvasta
kuormituksesta aiheutuvaa painumiskäyttäytymistä. Se miten hyvin ennuste
päteee jatkossa riippuu siitä pysyvätkö olosuhteet muuttumattomina, tai jos ne
muuttuvat, niin pystytäänkö se ottamaan huomioon. Koska kyseessä on
pystyajakohde olisi ollut odotettavaa, että painumapotentialiaalin arvo piene-
nee primaarivaiheen jälkeen.

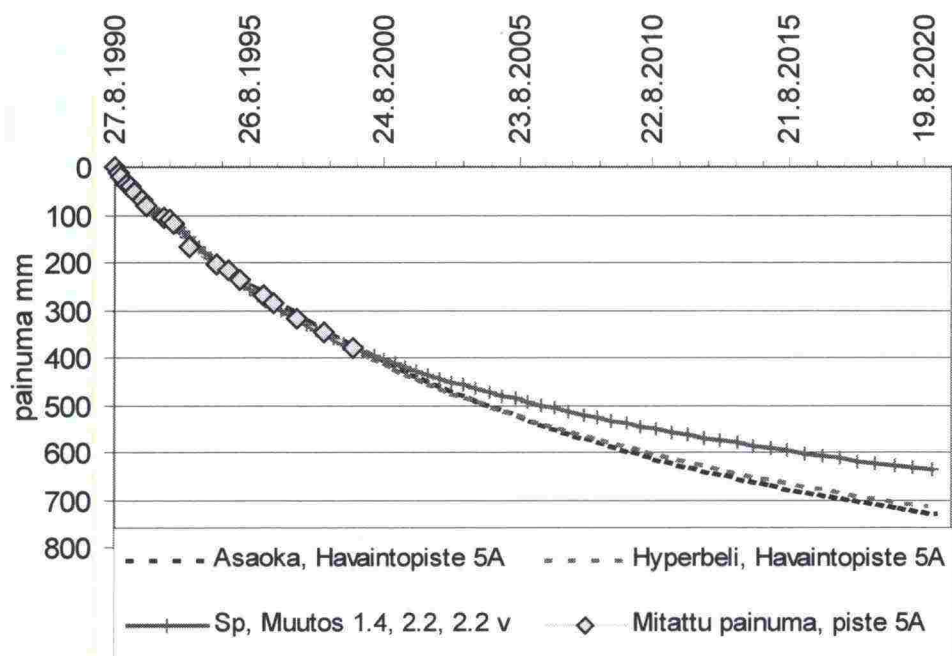
Eri menetelmin tehdyt 30 vuoden painumaennusteet on esitetty kuvassa 56.
Asaokan menetelmässä ja hyperbelimenetelmässä on sovitukseen otettu
vain loppuosan havaintopisteet, joissa pengerkuorma on ollut vakio. 30 vuo-
den painuma-arvio on painumapotentialialimenetelmällä 634 mm, Asaokan
menetelmällä 722 mm ja hyperbelimenetelmällä 715 mm. On mielenkiin-
toista havaita, että nyt kun pengerkuorma on kasvanut kesken painuma-
ajan, antavat Asaokan menetelmä ja hyperbelimenetelmä suuremmat pai-
numa-arviot kuin painumapotentialialimenetelmä. Vakio-olosuhteissa tai pie-
nenevän kuormituksen yhteydessä on painumapotentialialimenetelmä aina
antanut suurimman painuma-arvion.



Kuva 54. Pikku Huopalahti, Piste 3674/5A. Pengerkorkeus sekä havaittu ja sovitettu painumapotentiaali ajan funktiona.



Kuva 55. Pikku Huopalahti, Piste 3674/5A. Painumapotentiaalimenetelmän aika-painuma sovitus.



Kuva 56. Pikku Huopalahti, Piste 3674/5A. Eri menetelmin tehdyt 30 vuoden painumaennusteet.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Rakenteiden käytönaikainen painumaseuranta saattaa tuoda esiin virheitä tehdyissä painumalaskelmissa. Aina ei painumalaskelmia ole tehty lainkaan. Tällaisissa tilanteissa kaivataan usein menetelmää, jolla voidaan painumahavaintoja hyödyntäen arvioida tulevia painumia. Tässä raportissa on tutkittu Janbun esittämän painumapotentialimenetelmän hyödyntämistä painumien arvioinnissa. Työssä on kehitetty painumapotentialimenetelmää edelleen, etenkin painuma-ajan alkuosan painumien arvioimisen osalta. Uutena menetelmänä on esitetty hyperbelisovitus painumapotentialille. Painumaarvioinnin laatimiseen käytettyyn ohjelmaan on lisäksi sisällytetty mahdollisuus pienentää painumapotentialin arvoa olosuhteiden muuttuessa. Lisäksi raportissa on käsitelty Suomessa aikaisemmin käytössä olleita Asaokan menetelmää (Asaoka 1978) ja hyperbelimenetelmää (Korhonen 1977).

Painumapotentialimenetelmän hyvänä puolena on, että se pohjautuu klassisiin teorioihin. Sen avulla voidaan näin ollen myös määrittää maaparametrejä. Vaihtoehtoisesti voidaan menetelmän parametrejä arvioida myös pelkkien lähtötietojenkin perusteella. Menetelmää voidaan näin ollen käyttää myös tavalliseen painumalaskentaan.

Kaikilla käsiteltävillä menetelmillä analysoitiin 11 kohteen painumahavainnot. Osalla kohteista oli eri olosuhteita vastaavia painumahavaintopisteitä. Kohteiden rakenteet käsittivät koepenkereitä, tiepenkereitä, piha-alueita, täyttöjä sekä rakennuksia. Pohjasuhteet vaihtelivat silttisestä savesta turpeeseen. Suurin osa kohteista oli perustettu vahvistamattoman pohjamaan varaan, mutta osalla kohteista oli käytetty pystyjoitusta tai pilaristabilointia. Kaikkiaan analysoitavia painumahavaintopisteitä oli 60 kpl, joille kaikille tehtiin painuma-arviot. Jokaisesta kohteesta tai saman kohteen eri olosuhdetta vastaavasta havainnosta analysoitiin yksi piste tarkemmin. Eri menetelmien soveltuvuutta tutkittiin tekemällä painuma-arvio eri aikaväleihin tehtyjen havaintojen perusteella. Aikavälit olivat soveltuvien osien 6 kk, 1 v, 2 v, 4 v ja 8 v. Kohteiden painumahavainnot jaettiin kyseisiin aikaväleihin ja painuma-arviot tehtiin alkaen pienemmästä havaintoajasta. Painuma-arviot tehtiin kohteen pisimmälle havaintoajalle ja saatuja tuloksia verrattiin toteutuneisiin painumiin.

Tarkasteltavista menetelmistä selvästi parhaimmat tulokset saatiin painumapotentialimenetelmällä. Tulokset osoittivat, että yhden vuoden painumahavaintojen perusteella saatiin yleensä hyvin luotettava painuma-arvio mikäli havaintoja oli tehty riittävästi ja olosuhteet pysyivät muuttumattomina jatkossa. Useassa kohteessa saatiin jo puolen vuoden havaintojen jälkeen melko hyvä painuma-arvio. Painuman alkuaikana, jolloin painumapotentialiaali ei vielä ole saavuttanut vakioarvoa, käytettiin painumapotentialin arvioimiseen kahta eri sovitusta. Tässä työssä näitä sovituksia on kutsuttu paraabelisovitukseksi ja hyperbelisovitukseksi. Paraabelisovitus pohjautuu klassiseen

konsolidaatioteoriaan ja on alun perin Janbun esittämä (Janbu 1998). Hyperbelisovitus kehitettiin tämän työn yhteydessä. Näiden kahden menetelmän kombinaatio osoittautui hyväksi. Paraabelisovituksen hyvänä puolena on, että koska se pohjautuu klassiseen konsolidaatioteoriaan voidaan sen avulla arvioida konsolidaatiokertoimen arvoa. Toisaalta laboratorioissa määritetyn konsolidaatiokertoimen avulla voidaan arvioida sovituksen käyttämää aikaa t_{50} . Hyperbelisovituksen hyvänä puolena puolestaan on se, että sen parametreinä on alkupainumanopeus ja painumapotentiaalin lopullinen arvo. Alkupainumanopeus saadaan yleensä jo hyvin lyhyen painuma-ajan jälkeen jolloin myös painumapotentiaalille saadaan arvio varhain. Sovitukset täydentävät toisiaan ja niitä on suositeltavaa käyttää yhdessä.

Parhaiten painumapotentiaalimenetelmä toimi kohteissa, joissa pohjamaa oli vahvistamaton. Pystyjojitetuilla kohteilla havaittu käyttäytyminen poikkesi odotetusta. Janbu (1994) on esittänyt painumapotentiaalin arvoja eri pystyjojakohteista, joissa painumapotentiaalin arvo on alkuvaiheen maksimiarvon jälkeen selvästi pienentynyt. Käyttäytyminen on johtunut tavallista nopeammasta konsolidoitumisesta. Vastaavaa käyttäytymistä ei ole kuitenkaan havaittu analysoitavista kohteista. Osalla kohteista syynä tähän voi olla liian lyhyt havaintoaika. Mikäli painumapotentiaalin arvo pienenee jatkossa ovat esitetyt painuma-arviot näissä kohteissa liian suuria.

Raportissa tarkasteltavat syvästabilointikohteet poikkesivat nykyisestä "hyvästä" stabilointitavasta sillä, että kohteiden painuminen on jatkunut hyvin pitkän aikaa. Stabilointi on parantanut maan ominaisuuksia, muttei ole kyennyt estämään pitkänajan painumisia. Painumapotentiaalimenetelmä on toiminut näillä kohteilla hyvin. Jos syvästabilointi tehtäisiin nykyisen käytännön mukaisesti pyrittäisiin painumat ottamaan jo rakennusaikana. Tällöin ei myöskään tarvittaisi painuma-arviota.

Asaokan menetelmä toimi huonosti kaikissa kohteissa. Menetelmän parametrien sovitustapa antaa helposti liian hyvän kuvan menetelmän sopivuudesta havaintoaineistoon. Menetelmä pystyi ennustamaan tulevia painumia vain hyvin lyhyen ajan päähän. Yleensä menetelmä aliarvioi painumia. Hyperbelimenetelmällä saatiin parempia tuloksia kuin Asaokan menetelmällä mutta yleensä kuitenkin selvästi huonompia kun painumapotentiaalimenetelmällä. Hyperbelisovitus antoi silmämääräisesti usein melko hyvän sovituksen painumahavaintoihin. Se ei kuitenkaan yleensä kyennyt ennustamaan tulevia painuma kovinkaan pitkälle. Menetelmä vaatii melko pitkän havaintoajan ennen kuin sillä saadaan luotettava painuma-arvio. Yleensä menetelmä aliarvioi painumia.

6 KIRJALLISUUTTA

Asaoka, A. (1978). Observational procedure of settlement prediction. Soils and foundations, Vol. 18, No. 4. S. 87-101.

Forsman, J. ja Lojander, M. (1995). Yksityistien Y607 (pl. 244-284 ja 602-724) laboratoriotutkimukset, Leteensuu, Hattula. Geovahvistetutkimus, vaihe III. Koerakennuskohde "Turpeen varaan rakennettu päällystämätön geovahvistettu tie". TKK, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto.

Janbu, N. (1991). Stress-strain-time behaviour of porous media. A case record based review. X ECSMFE, Firenze 1991, Proc. Vol. I, s. 129-132. Tai Bulletin 29, Norwegian University of Science and Technology, Department of Geotechnical Engineering. Trondheim.

Janbu, N. (1994). In situ creep behaviour obtained from long-term settlement observations. XIII ICSMFE, New Delhi 1994. Proc. Vol. 2, s. 767-770. Tai Bulletin 29, Norwegian University of Science and Technology, Department of Geotechnical Engineering. Trondheim.

Janbu, N. (1995). Deformations of soils with collapsible grain structure. The Ian Boyd Donald Symposium on modern developments in geomechanics, Monash University, Australia 1995. Proc. s. 127-137. Tai Bulletin 29, Norwegian University of Science and Technology, Department of Geotechnical Engineering. Trondheim.

Janbu, N. (1998). Sediment deformations. Bulletin 35, Norwegian University of Science and Technology, Department of Geotechnical Engineering. Trondheim.

Kantee, P. (1982). Painumahavaintoja ja -laskelmia Keravalla ja Leningradissa. Diplomityö. TKK, Rakennusinsinööriosasto.

Karstunen, M. (1993). Case: Paimio trial embankment. Calculations with Crisp90 in January 18, 1993. Helsinki University of Technology.

Korhonen, K.-H. (1977). Heikosti kantavan maapohjan konsolidoituminen. VTT, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Julkaisu 19. Espoo.

Korhonen, O. (1984). Vanhankaupungin lahden länsirannan täyttö, osa-alue II, pohjanrakennussuunnitelma. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen osasto.

Länsivaara, T. (1999). A study of the mechanical behavior of soft clay. Doctoral dissertation. Norwegian University of Science and Technology, Department of Geotechnical Engineering. Trondheim.

Näätänen, A. (1989). Pehmeikölle perustettavan penkereen painumalaskelmat. TKK, Rakennetekniikan laitos, Otaniemi.

Pohjonen, A. (1990). Liuskapystyöjakenttien toiminnasta. Tielaitoksen selvityksiä 2/1990. Tielaitos.

RIL (1985). RIL 157 I Geomekaniikka I. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, Helsinki 1985.

Saarelma, M. (1976). Itäkeskuksen III päiväkotia "Herukka" Tso 1911, pohjanvahvistustöiden työselitys. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geoteknillinen toimisto.

Selkämaa, E. (1994). Koepenger Seinäjoki, Murro. Insinööritö. Seinäjoen Teknillinen Oppilaitos, Rakennustekniikan osasto.

Tielaitos (1997). Haarajoen koepenkereen painumalaskentakilpailu. Kilpailumateriaali.

Tiehallinto (2001). Haarajoen koepenkereen painumalaskelmakilpailu. Lopputaportti.

Tiehallinto (2001). Competition to calculate settlements at the Haarajoki test embankment. [http://www.tiehallinto.fi/pailas/pailas.htm#Kilpailun esittely](http://www.tiehallinto.fi/pailas/pailas.htm#Kilpailun_esittely)

Vepsäläinen, P. ja Arkima, O. (1992). Tiepenkereen holvautuminen. Loppuraportti. Tielaitos, Tielaitoksen tutkimuksia 4/1992.

Vepsäläinen, P., Arkima, O., Lojander, M. ja Näätänen, A. (1991). The trial embankments in Vaasa and Paimio, Finland. X ECSMFE, Firenze 1991.

Viatek Oy (1997). Koerakenteen suunnittelu, rakentaminen ja seurantamittaukset. Yksityistie Y607, Leteensuu, Hattula. Geovahvistetutkimus, vaihe III. Koerakennuskohde "Turpeen varaan rakennettu päällystämätön geovahvistettu tie".

Viatek Oy (2000). Seurantamittaukset 1996...1999. Yksityistie Y607, Leteensuu, Hattula. Geovahvistetutkimus, vaihe III. Koerakennuskohde "Turpeen varaan rakennettu päällystämätön geovahvistettu tie".

Yrjänä, J. ja Korhonen, O. (1991). Pystyöjitus Pikku-Huopalahdessa. Tiedote 55/1991, Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto, geotekninen osasto.

7 LIITTEET

Painettuna

- LIITE I Yhteenveto painumien arvioimisesta painumapotentialimene-
telmällä
- LIITE II Murron koepenger 15 s.

Takakannen CD -levyllä

- LIITE I Yhteenveto painumien arvioimisesta painumapotentialimene-
telmällä
- LIITE II Murron koepenger 36 s.
- LIITE III Haarajoen koepenger 48 s.
- LIITE IV Vaasan koepenger 27 s.
- LIITE V Paimion koepenger 21 s.
- LIITE VI Keravan veturitalli 15 s.
- LIITE VI b Keravan kääntölava 15 s.
- LIITE VII Naantali-Turku Mt 189 12 s.
- LIITE VIII Leteensuon koetie 18 s.
- LIITE IX Vanhankaupungin lahti 27 s
- LIITE X Itäkeskuksen päiväkotie 30 s.
- LIITE XI Pikku-Huopalahti, Tilkan stabilointi 24 s.
- LIITE XII Pikku-Huopalahti, Korppaanmäentie 12 s.

Yhteenveto painumien arvioimisesta painumapotentialimenetelmällä

1. Laske painumapotentialin S_p arvo havaitusta aika-painuma käyttäytymisestä.

$$S_p = \dot{\delta} \cdot t = \frac{\Delta \delta}{\Delta t} \cdot t$$

2. Painumapotentialin ja sitä vastaavan painuman yhtälöt ovat:

Paraabelisovitus

$$S_p = \begin{cases} S_{p0} \cdot \sqrt{\frac{t}{t_{50}}} & t \leq t_{50} \\ S_{p0} & t > t_{50} \end{cases}$$

$$\delta = \begin{cases} \delta_0 + \frac{2 \cdot S_{p0}}{\sqrt{t_{50}}} (\sqrt{t} - \sqrt{t_0}) & t \leq t_{50} \\ \delta_0 + 2 \cdot S_{p0} \left(1 - \frac{\sqrt{t_0}}{\sqrt{t_{50}}}\right) + S_{p0} \ln\left(\frac{t}{t_{50}}\right) & t > t_{50} \end{cases}$$

missä	S_{p0}	=	painumapotentialin vakioarvo.
	t	=	aika
	t_{50}	=	50 % konsolidaatioasteen saavuttamiseen kuluva aika
	t_0	=	alkupainuman kuluva aika
	δ_0	=	alkupainuma

Hyperbelisovitus

$$S_p = \frac{t}{a + b \cdot t}$$

$$\delta = \delta_0 + \frac{1}{b} (\ln(a + b \cdot t) - \ln(a + b \cdot t_0))$$

missä	a	=	alkupainumanopeuden käänteisluku
	b	=	painumapotentialin maksimiarvon käänteisluku

3. Parametrien arviointi

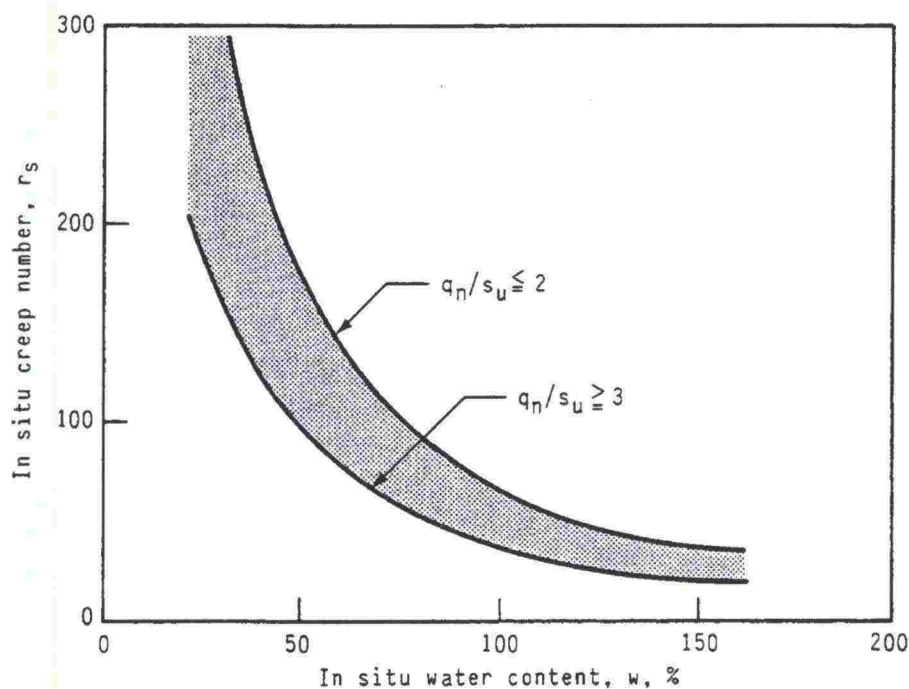
Painumapotentialin loppuarvo

$$S_{p0} = 1/4 \delta_p$$

tai

$$S_{p0} = \sum_1^n \frac{\Delta H}{r_s}$$

missä δ_p = laskettu primaaripainuma
 H = kerrospaksuus
 r_s = hiipumaluku, katso kuva L1.1



Kuva L1.1 Kenttähavainnon perusteella laskettu hiipumaluvun vaihteluväli vesipitoisuuden ja mobilisoituneen lujuuden funktiona (Janbu 1998).

$$r_s = \frac{1+e_0}{C_\alpha} \ln 10$$

$$r_s = \frac{m}{B} \quad (\text{Länsivaara 1999})$$

missä m = moduuliluku kun $\beta = 0$
 B = muodonmuutosnopeusparametri

t_{50} , eli 50 % konsolidaatioasteen saavuttamiseen kuluva aika yhtälöstä

$$t_{50} = 0,091 \frac{H^2}{c_v} \quad , \text{ yksipuolinen kuivatus}$$

$$t_{50} = 0,049 \frac{H^2}{c_v} \quad , \text{ kaksipuolinen kuivatus}$$

missä c_v = kerroksen keskimääräinen konsolidaatiokerroin

Hyperbelisovituksen parametri b , samoin kuin alkupainuma ja siihen kuluva aika mitattujen arvojen perusteella.

4. Sovita painuma- ja painumapotentialikäyrät havaittuihin arvoihin hyödyntäen tarvittaessa parametrien edellä esitettyjä riippuvaisuuksia ja tee näin saatujen lopullisten parametrien avulla tulevien painumien arviointi.
5. Laske lopullisten parametrien avulla kenttäarvot hiipumaluvulle sekä konsolidatiokertoimelle.

$$r_s = \frac{H}{S_{p0}}$$

$$c_v = 0,091 \frac{H^2}{t_{50}} \quad , \text{ yksipuolinen kuivatus}$$

$$c_v = 0,049 \frac{H^2}{t_{50}} \quad , \text{ kaksipuolinen kuivatus}$$

Painumaennuste

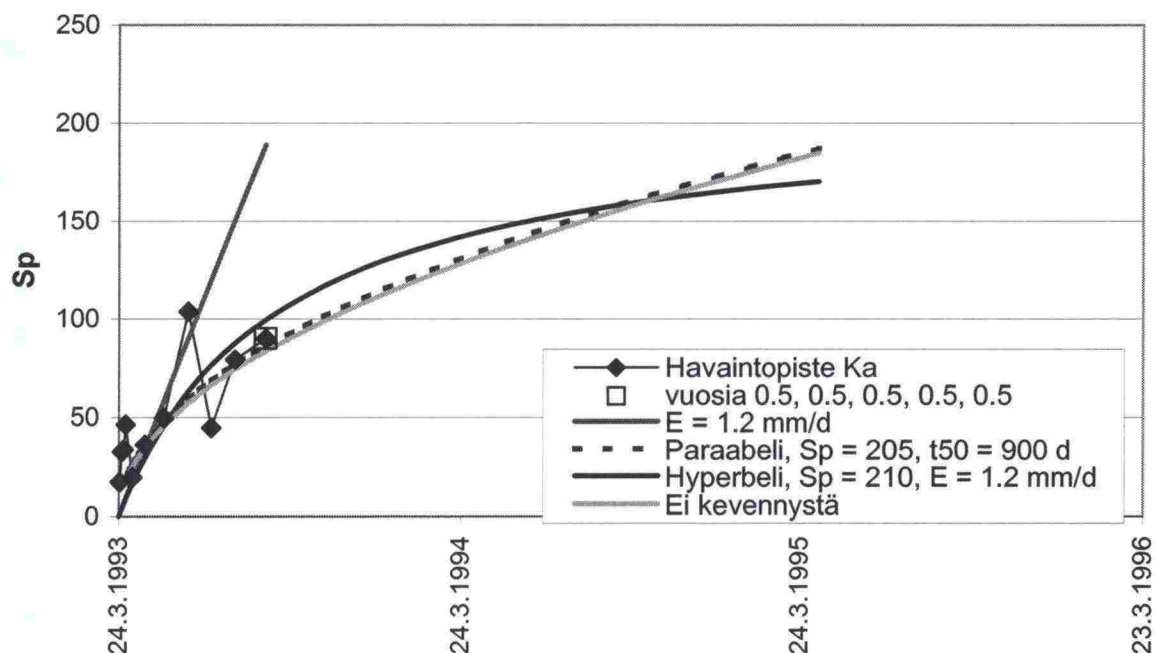
Painumapotentialiaali

LIITE II / s. 1

Koepenger, Murro 6 kk havainnot

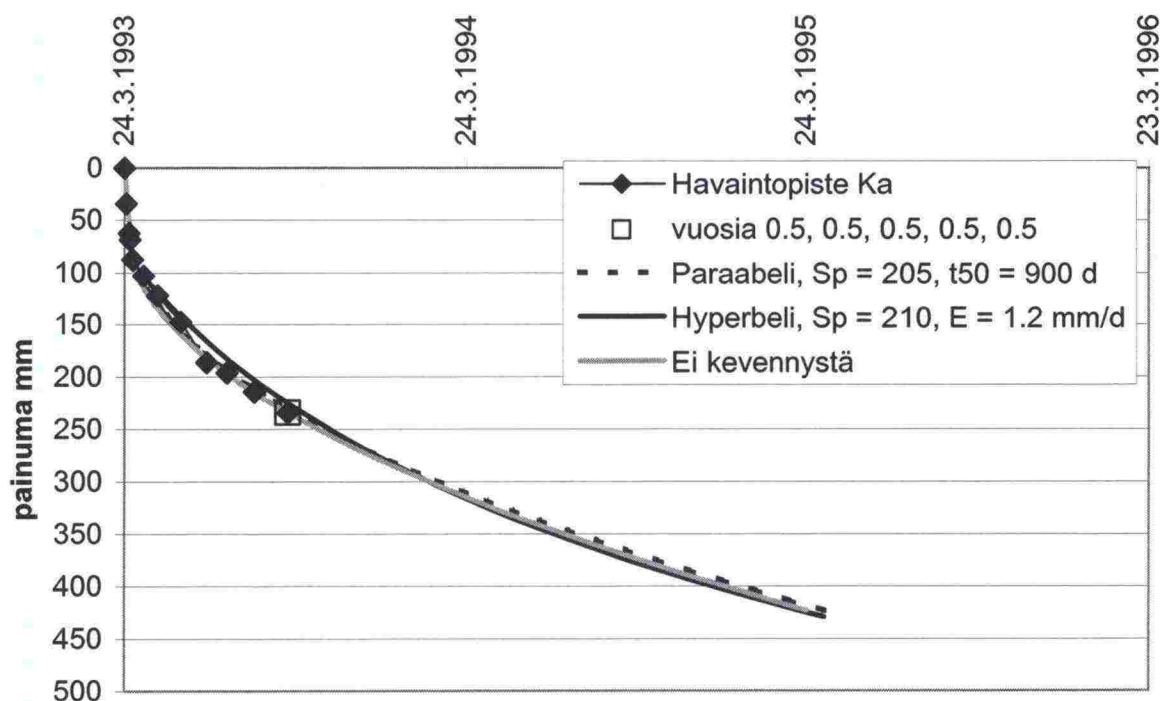
Havaintopiste Ka

● 1-puol. ki	H	w	m (b = 0)	m	alkupai.	t0 (d)	pain. t (a)	tod. t
○ 2-puol. ki	21	65	8.3...14	7	90	9	7.4	7.4
input				80				
	Sp	t50/E	rs	B	c _v	pain. 7.4	virh. mm	
Paraabeli	205	900	102	0.068	16.3	684	ei havaint.	
Hyperbeli	210	1.20	100	0.070		667	ei havaint.	

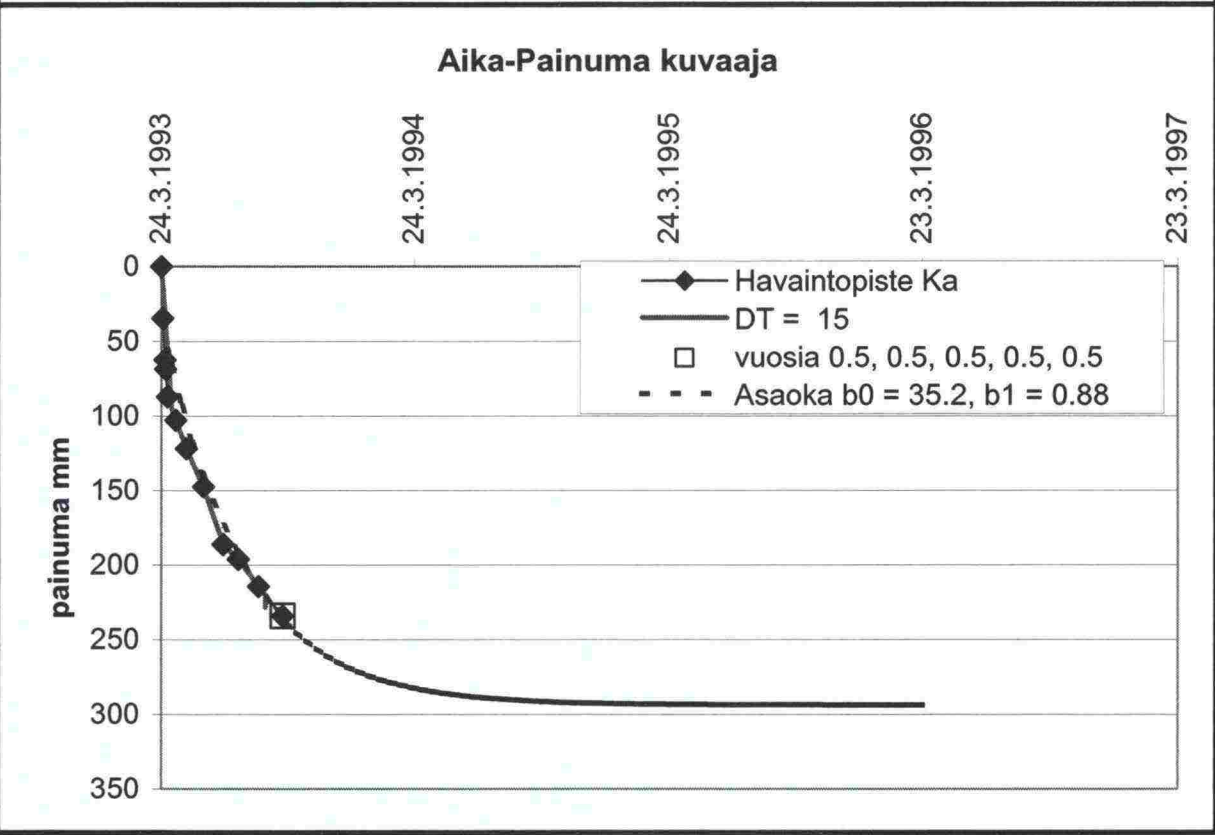
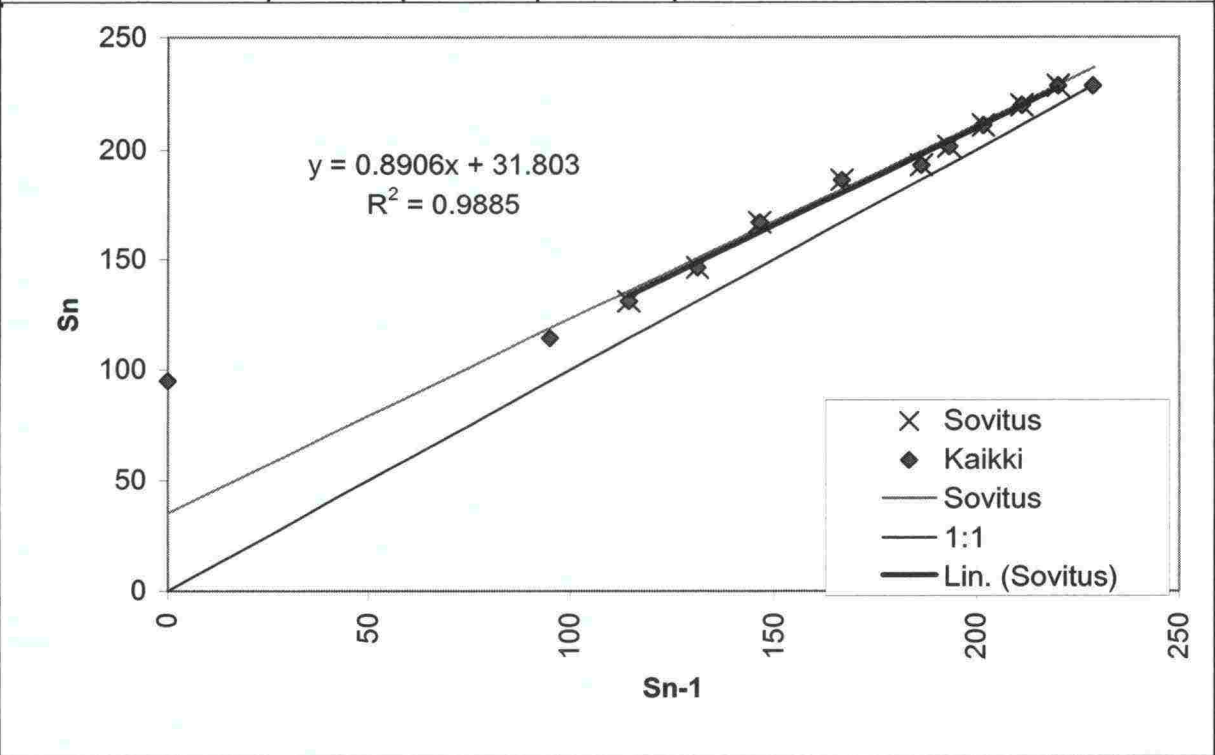


Aika-Painumapotentialiaali kuvaaja

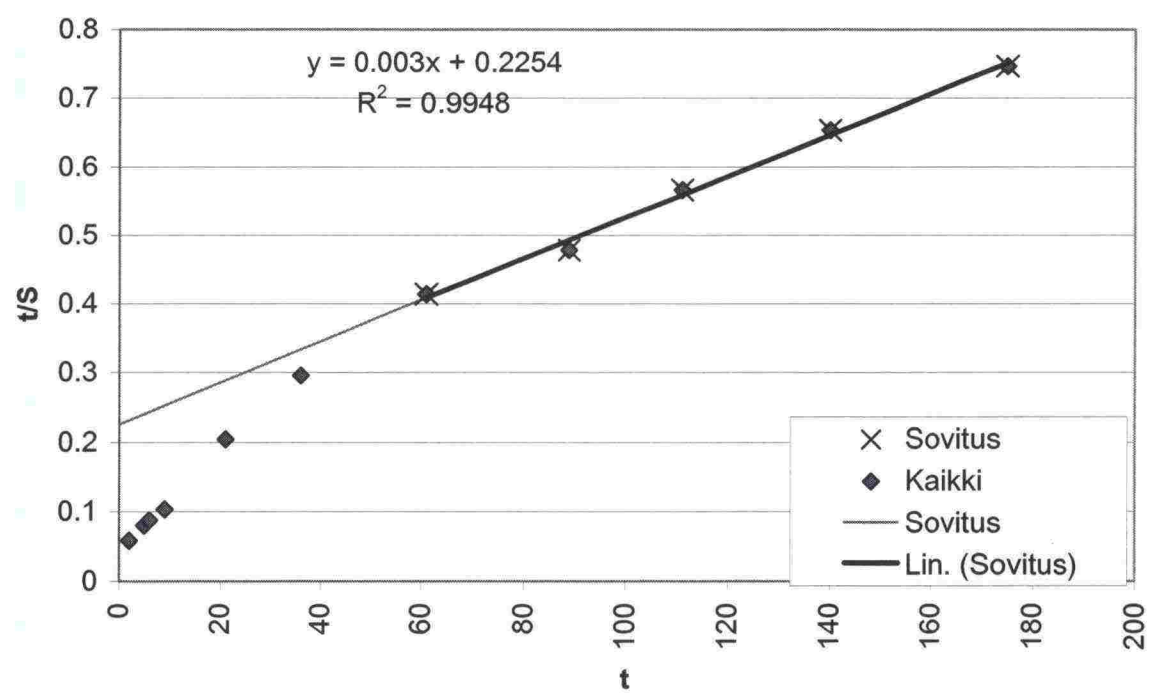
Aika-Painuma kuvaaja



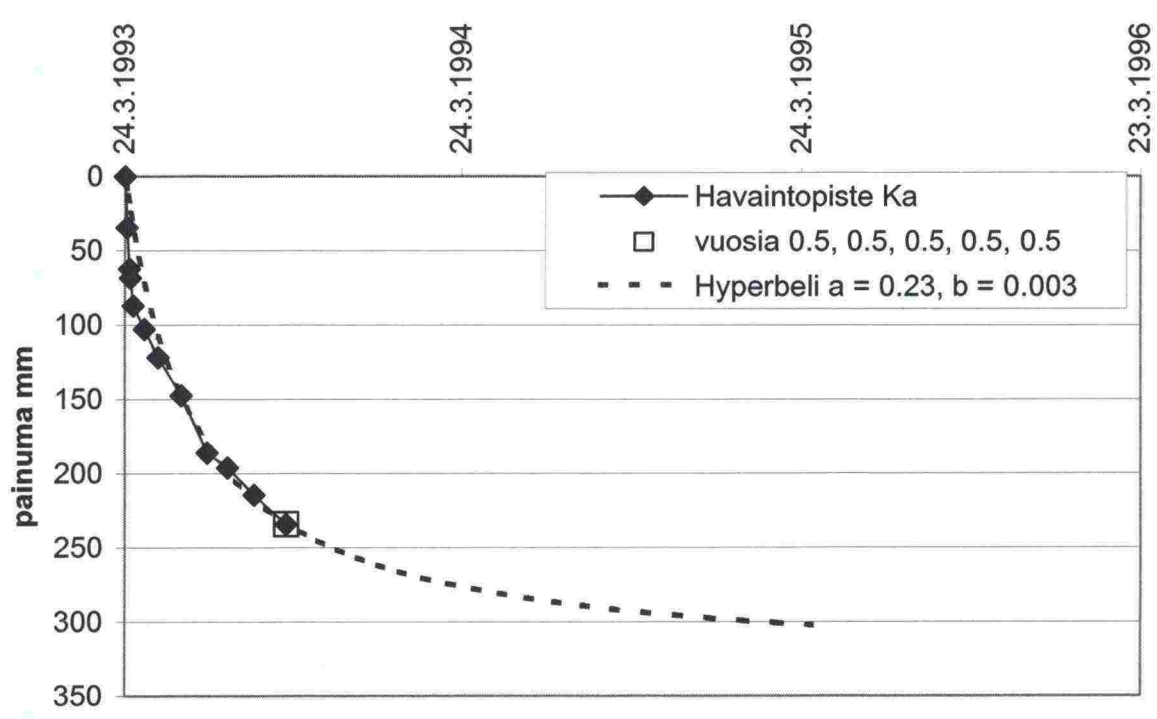
Painumaennuste		Asaoka	LIITE II / s. 2	
Koepenger, Murro 6 kk havainnot			Havaintopiste Ka	▼
			pain. t (a)	tod. t
			7.4	7.4
input			output	
	β_0	β_1	t	Prim. Pain.
Asaoka	35.2	0.880	15.00	294
	35.2	0.880	15.00	
				pain7.4
				virh. mm
				ei havaint.

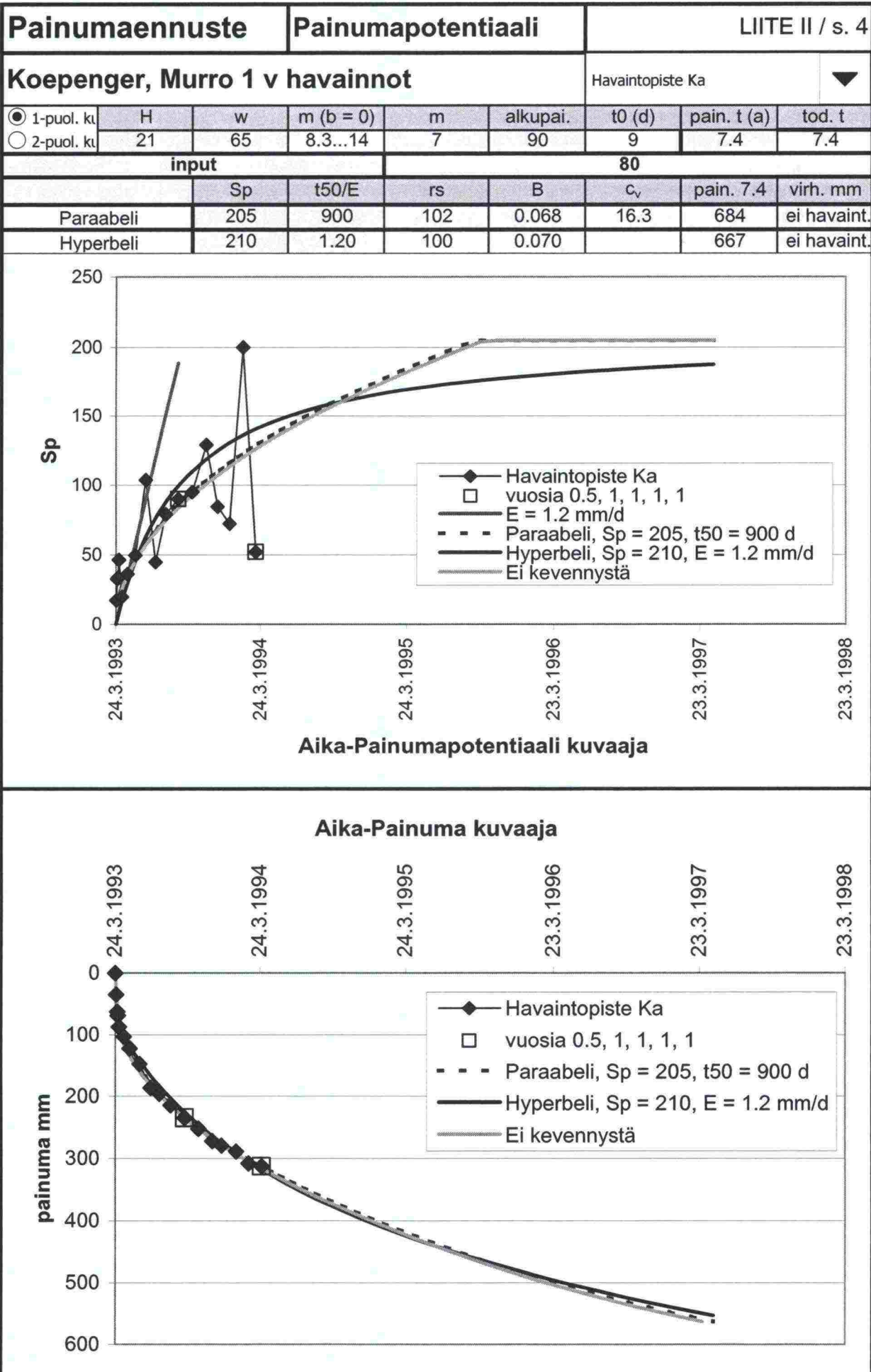


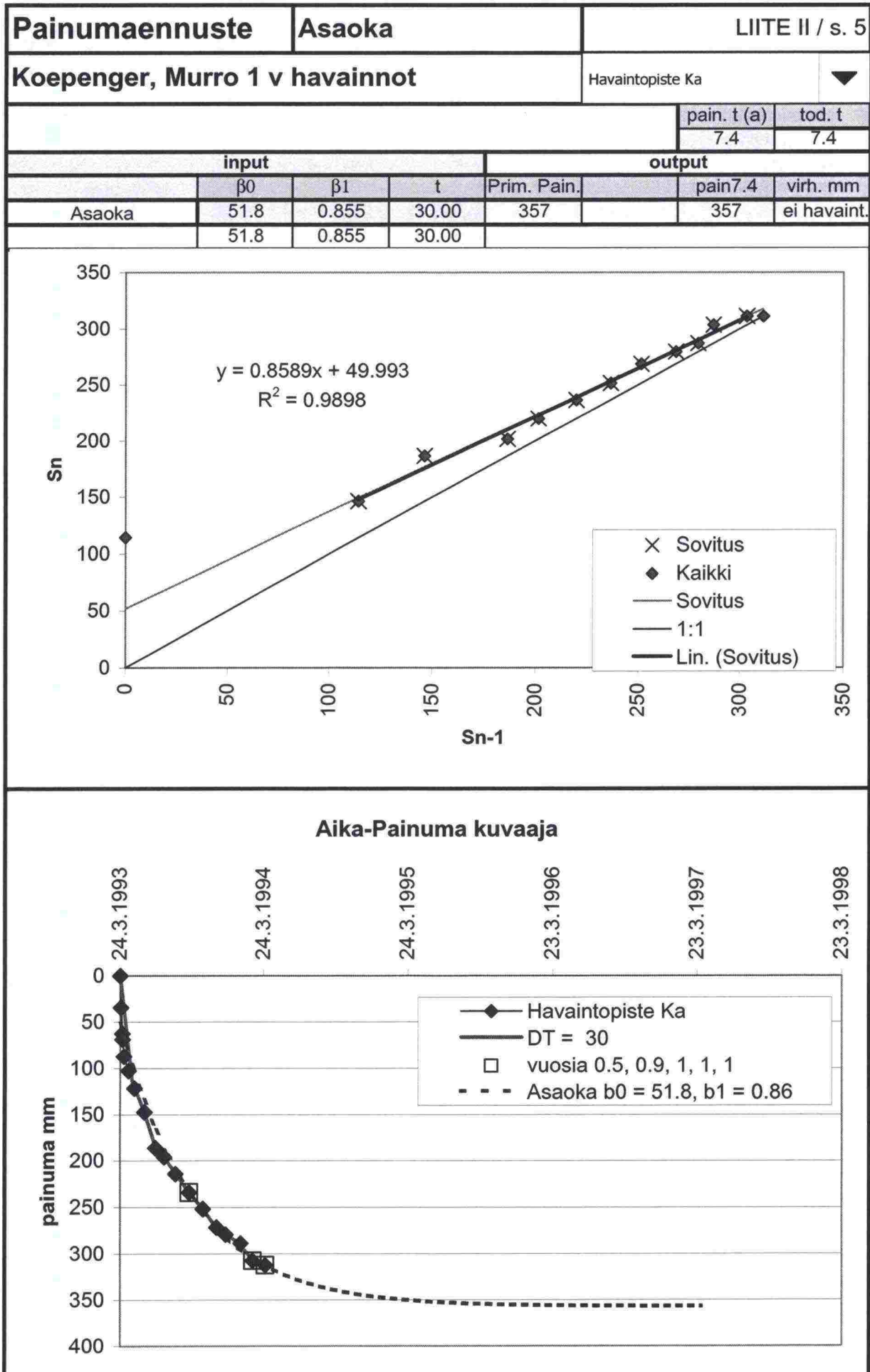
Painumaennuste		Hyperbeli	LIITE II / s. 3	
Koepenger, Murro 6 kk havainnot			Havaintopiste Ka	▼
			pain. t (a)	tod. t
			7.4	7.4
input		output		
	a	b	Painuma	pain7.4 virh. mm
Hyperbeli	0.23	3.01E-03	333	324 ei havaint.



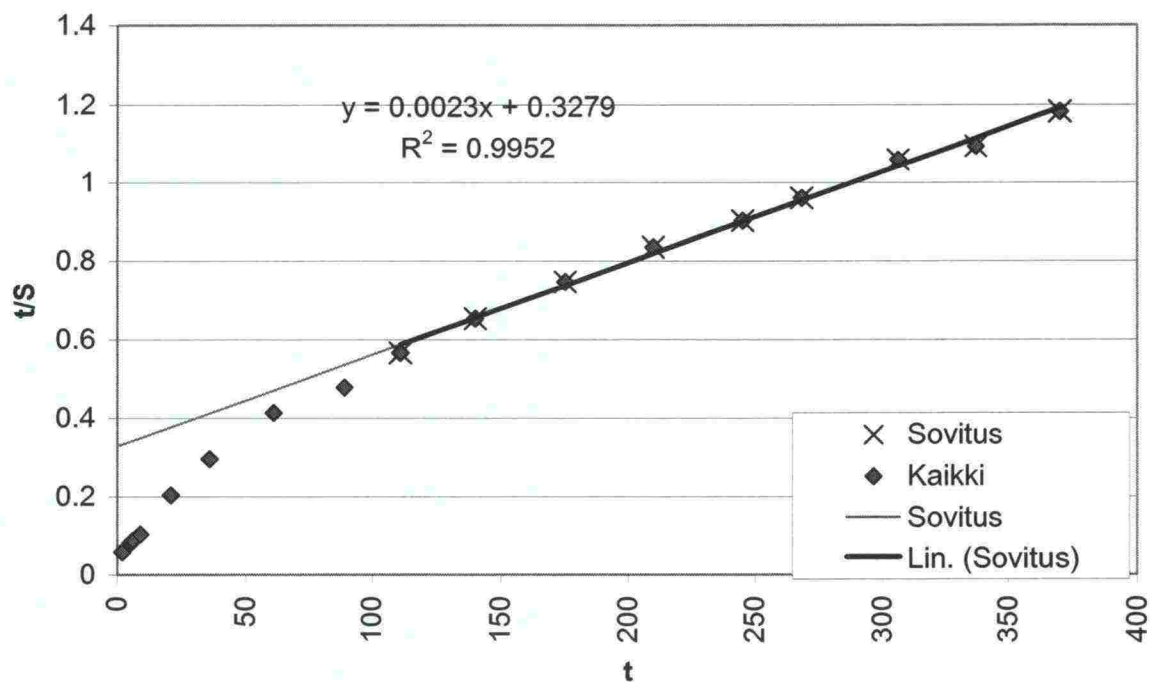
Aika-Painuma kuvaaja



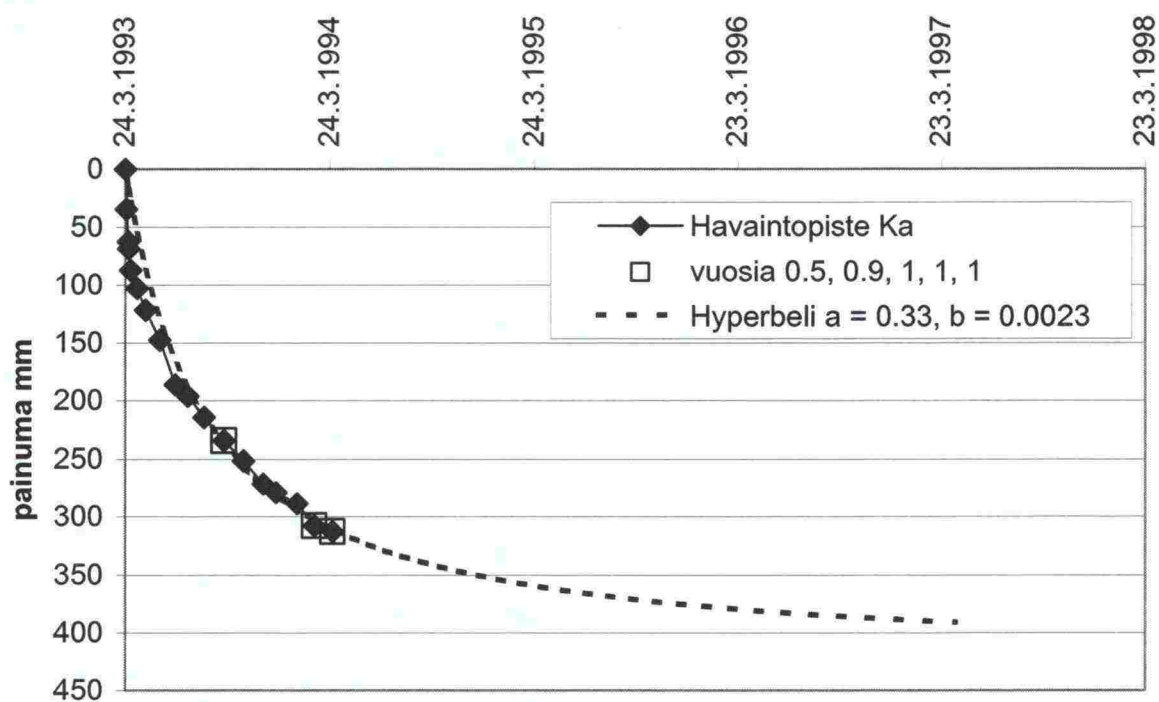


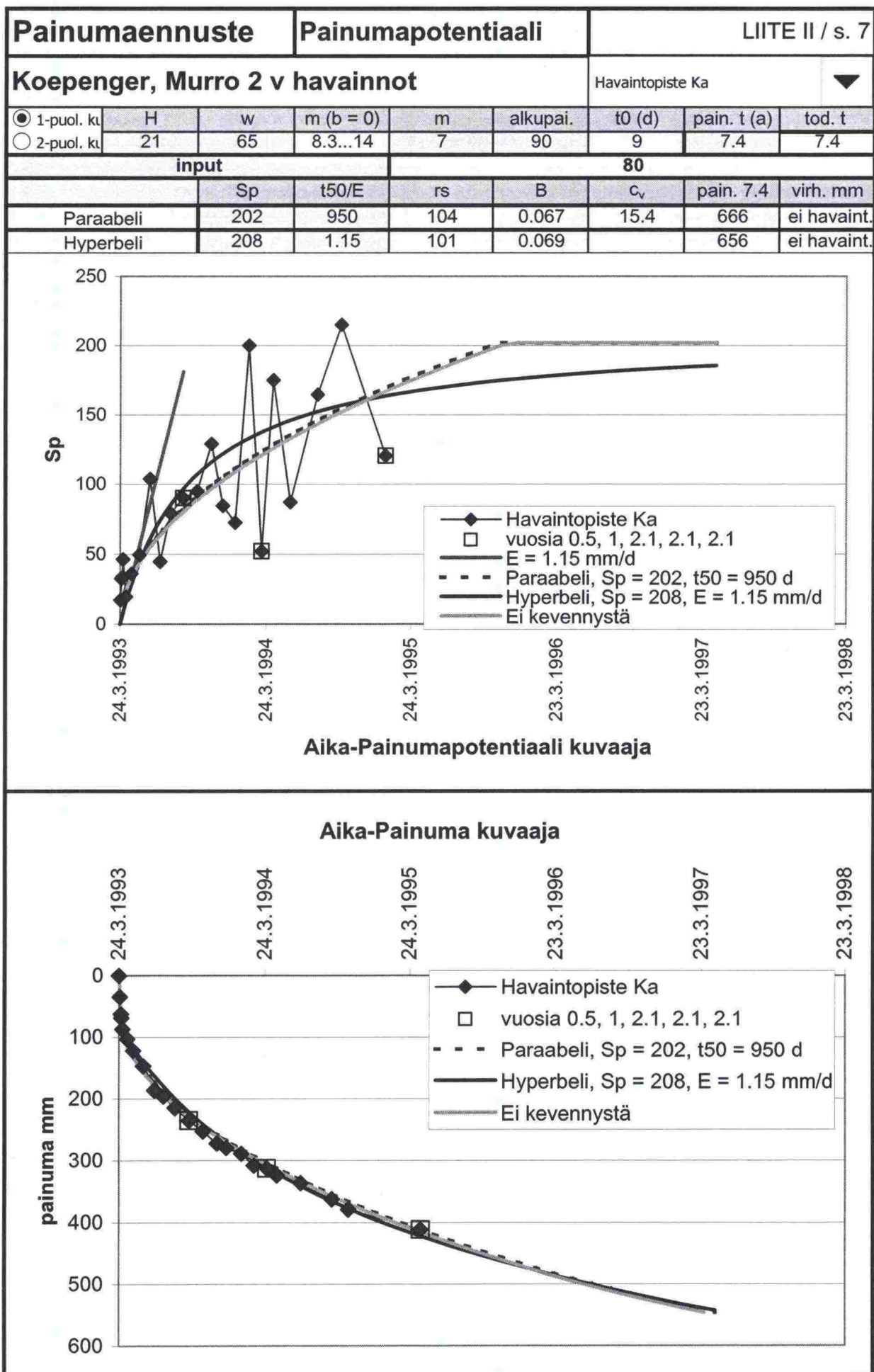


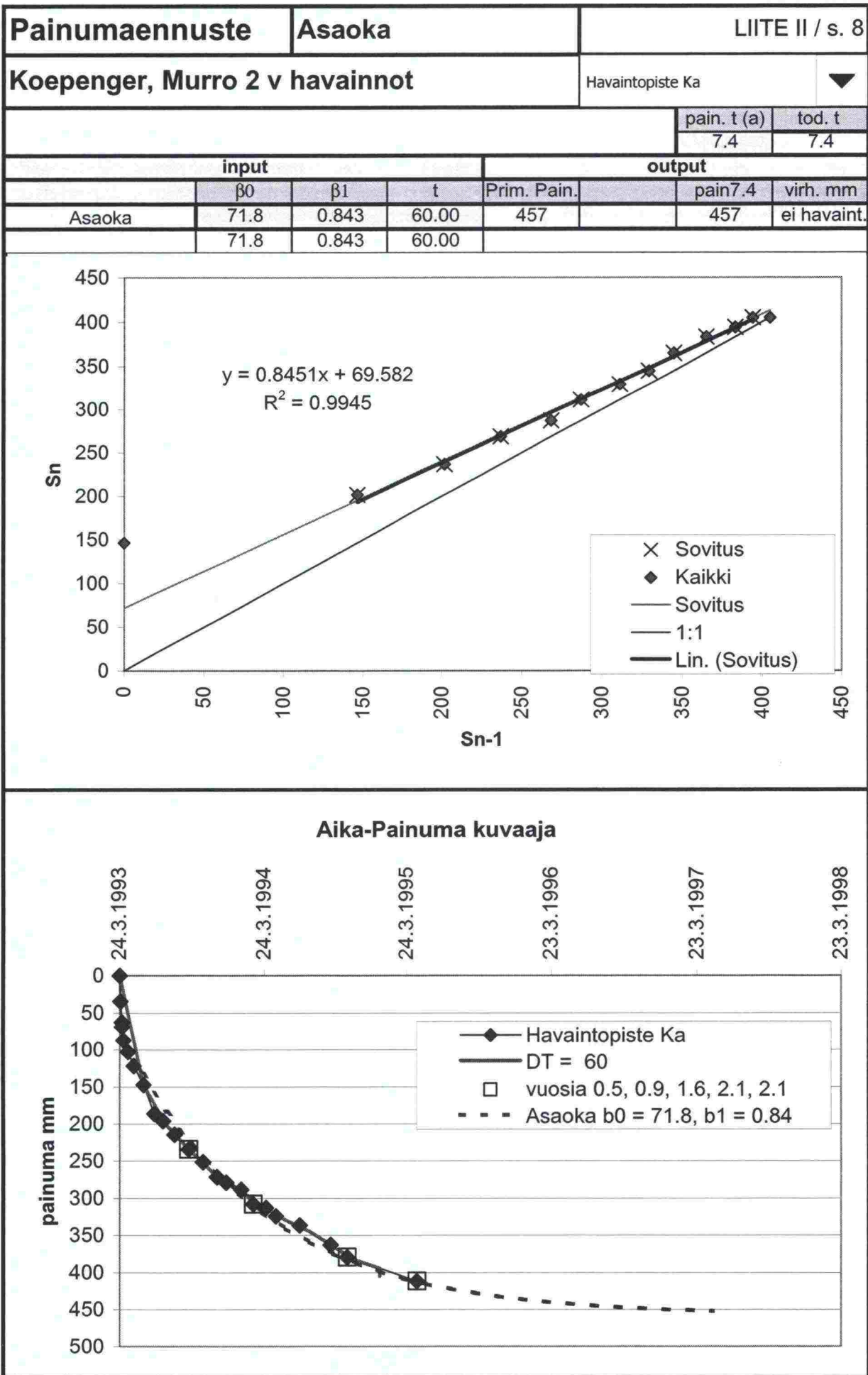
Painumaennuste		Hyperbeli	LIITE II / s. 6	
Koepenger, Murro 1 v havainnot			Havaintopiste Ka	▼
			pain. t (a)	tod. t
			7.4	7.4
input		output		
	a	b	Painuma	virh. mm
Hyperbeli	0.33	2.34E-03	428	ei havaint.



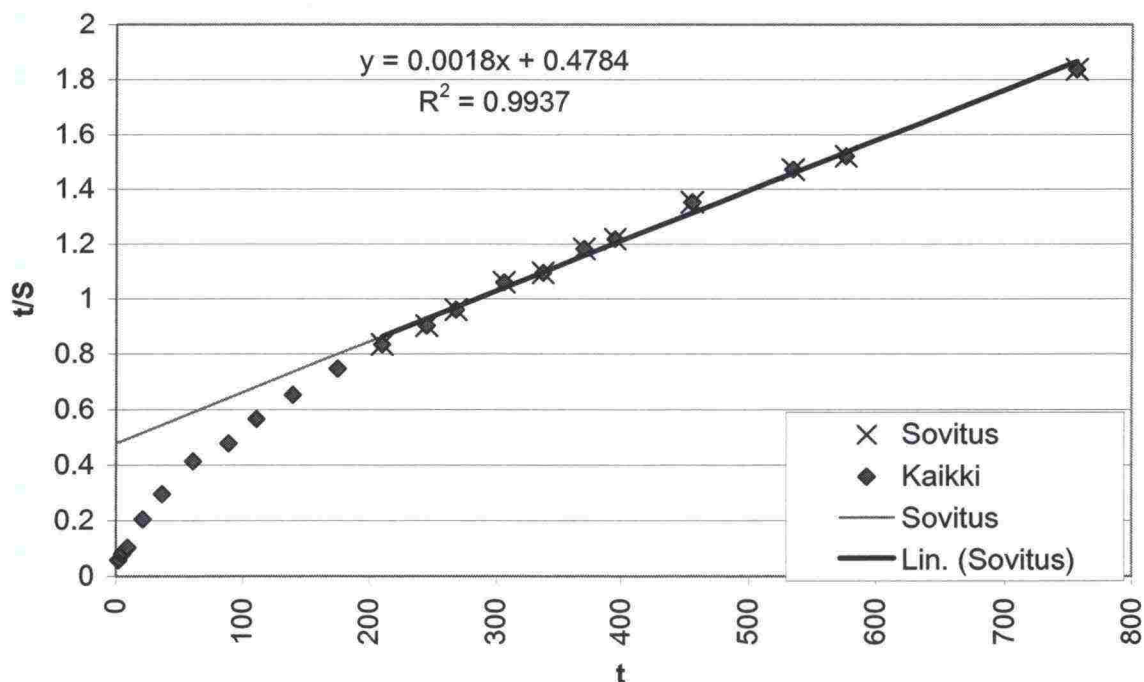
Aika-Painuma kuvaaja



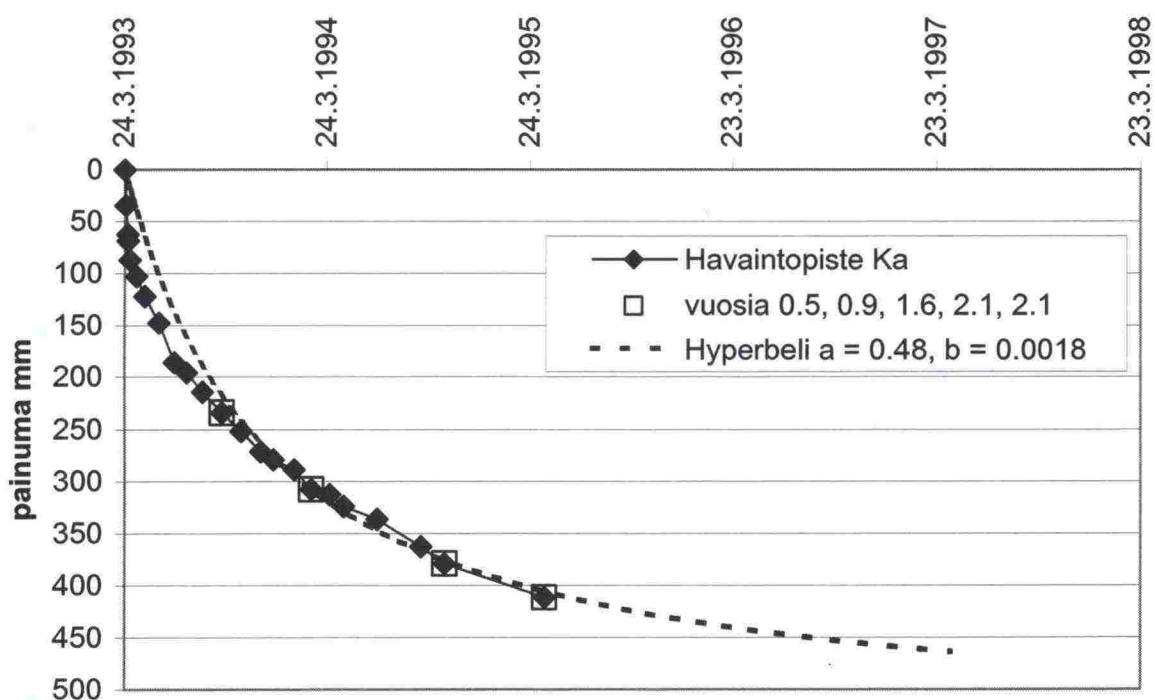




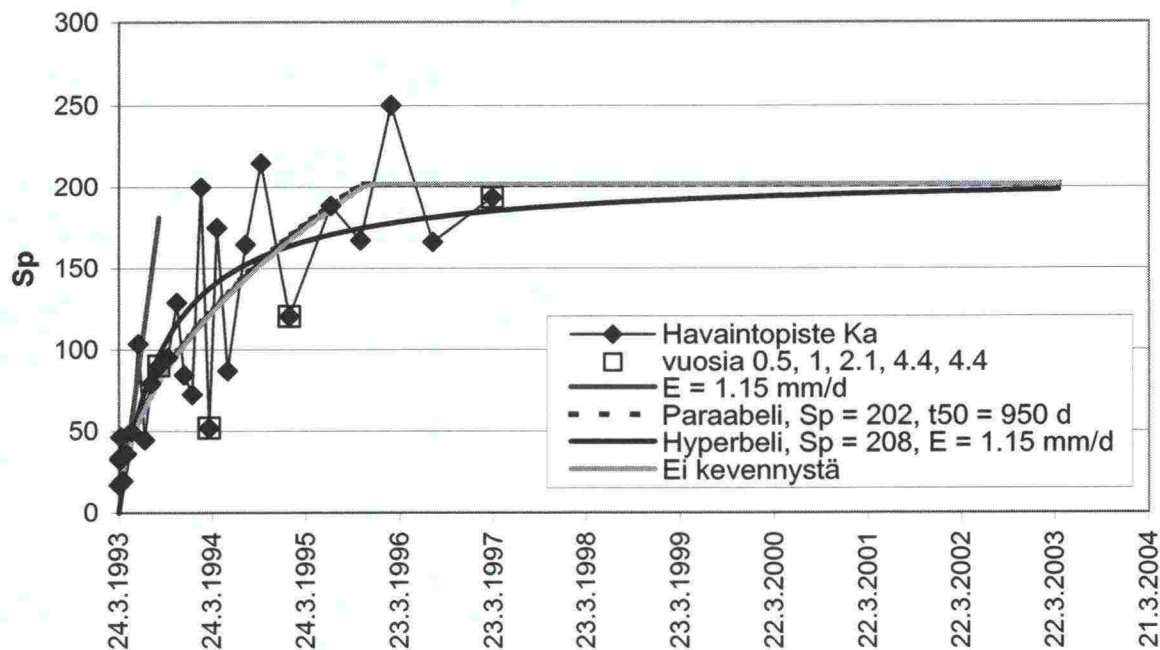
Painumaennuste		Hyperbeli	LIITE II / s. 9	
Koepenger, Murro 2 v havainnot			Havaintopiste Ka	▼
			pain. t (a)	tod. t
			7.4	7.4
input		output		
	a	b	Painuma	pain7.4 virh. mm
Hyperbeli	0.48	1.83E-03	545	497 ei havaint.



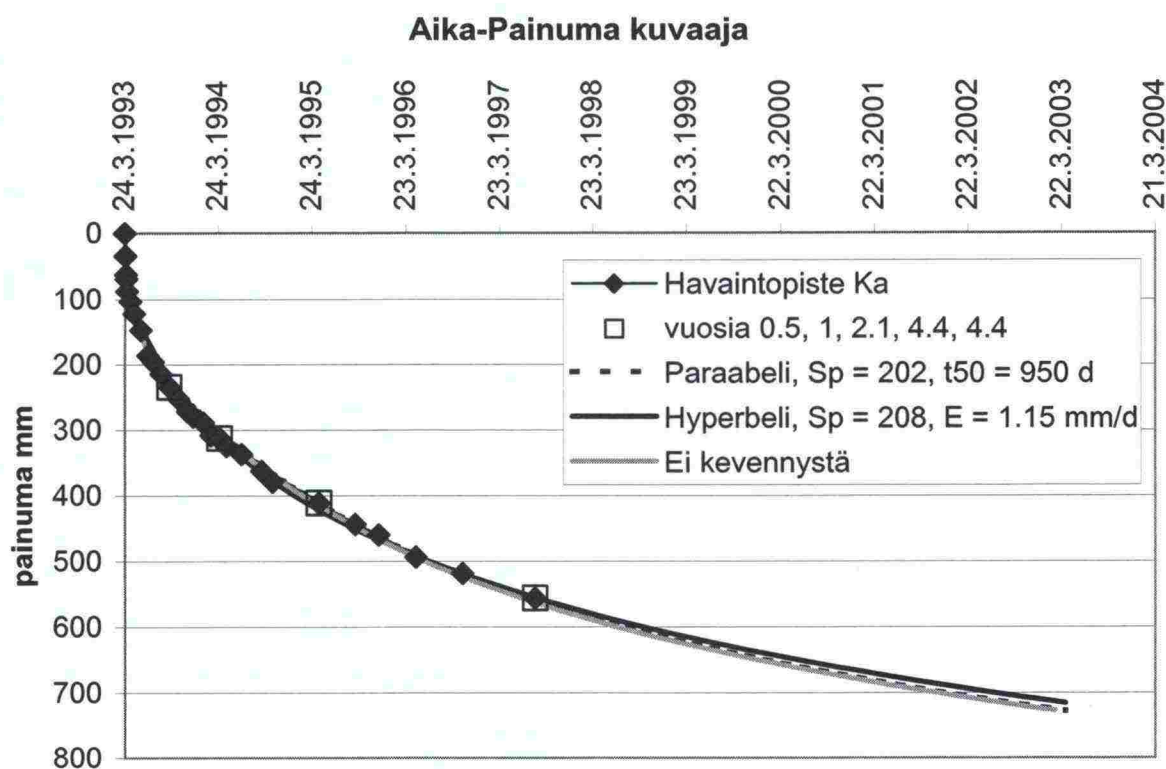
Aika-Painuma kuvaaja



Painumaennuste			Painumapotentiaali			LIITE II / s. 10		
Koepenger, Murro 4 v havainnot						Havaintopiste Ka		▼
● 1-puol. ku	H	w	m (b = 0)	m	alkupai.	t0 (d)	pain. t (a)	tod. t
○ 2-puol. ku	21	65	8.3...14	7	90	9	7.4	7.4
input				80				
	Sp	t50/E	rs	B	c _v	pain. 7.4	virh. mm	
Paraabeli	202	950	104	0.067	15.4	666	ei havaint.	
Hyperbeli	208	1.15	101	0.069		656	ei havaint.	

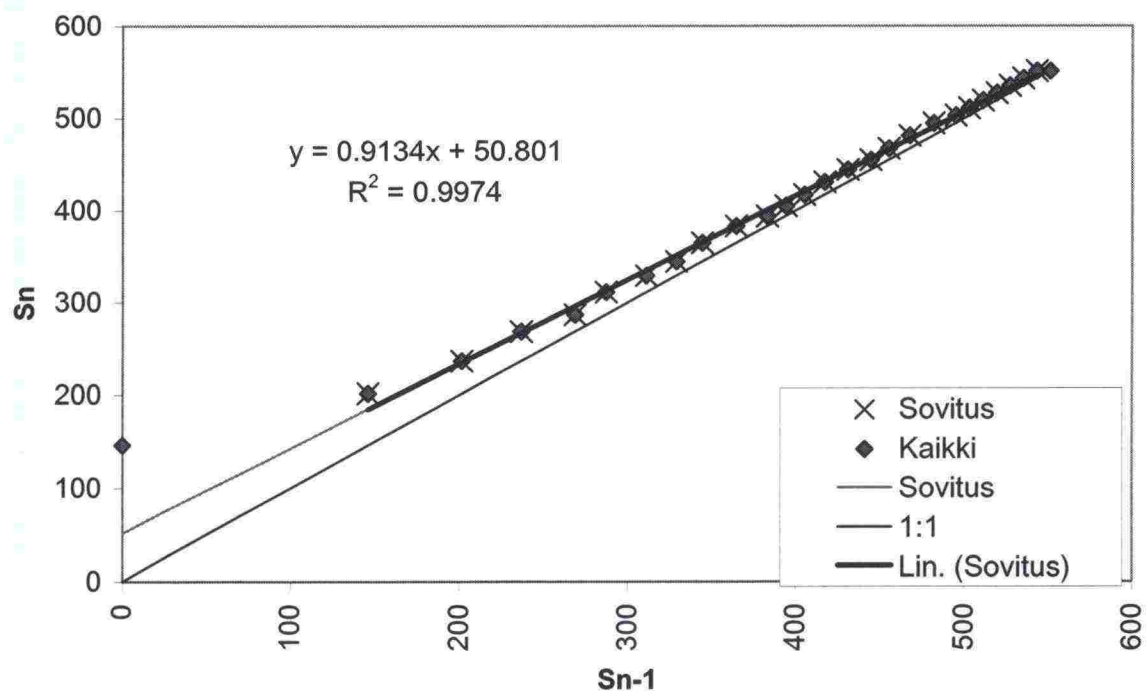


Aika-Painumapotentiaali kuvaaja

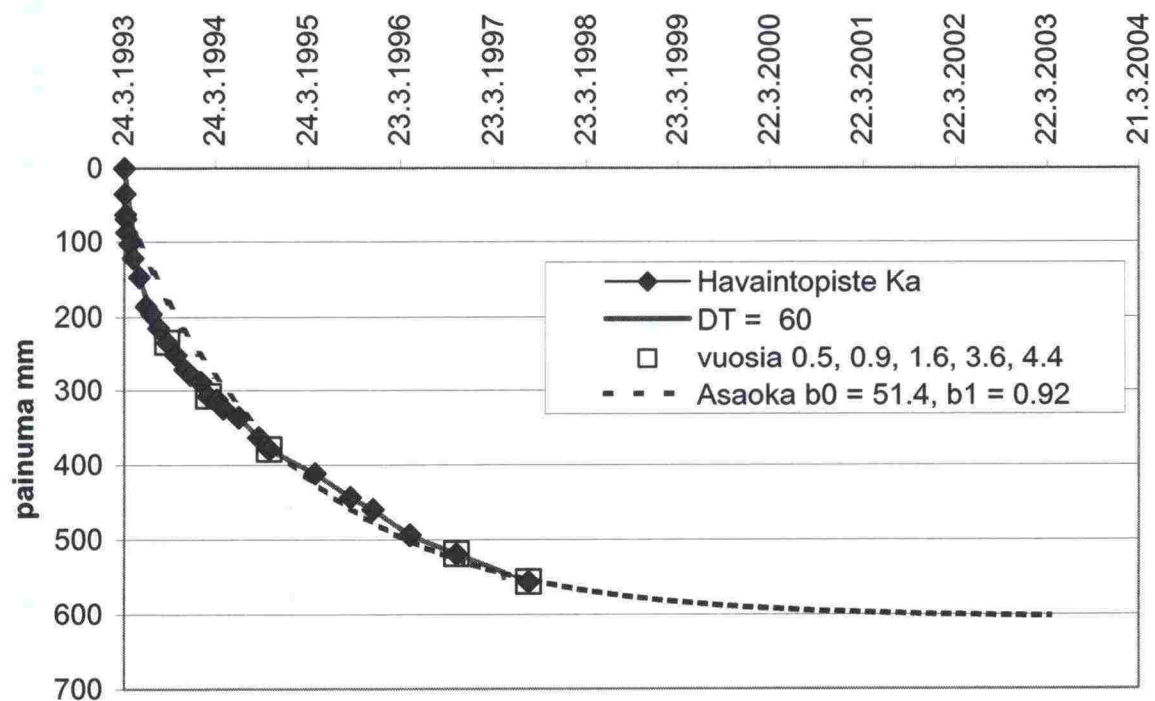


Aika-Painuma kuvaaja

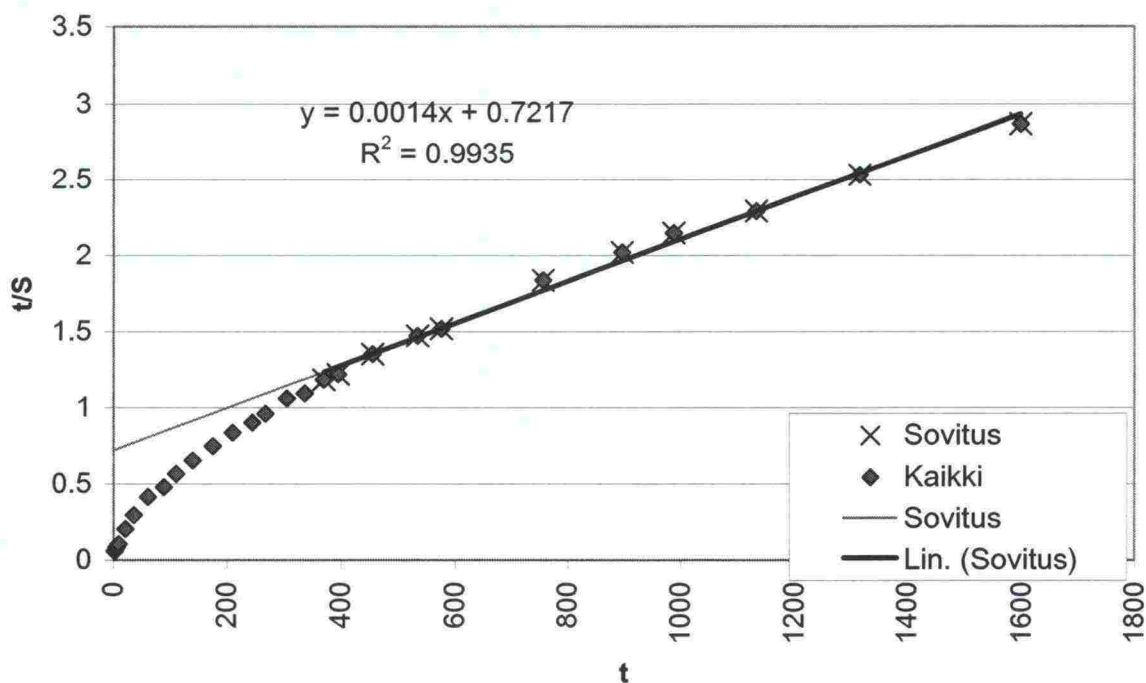
Painumaennuste		Asaoka		LIITE II / s. 11			
Koepenger, Murro 4 v havainnot				Havaintopiste Ka		▼	
				pain. t (a)		tod. t	
				7.4		7.4	
input				output			
	β0	β1	t	Prim. Pain.		pain7.4	virh. mm
Asaoka	51.4	0.915	60.00	605		594	ei havaint.
	51.4	0.915	60.00				



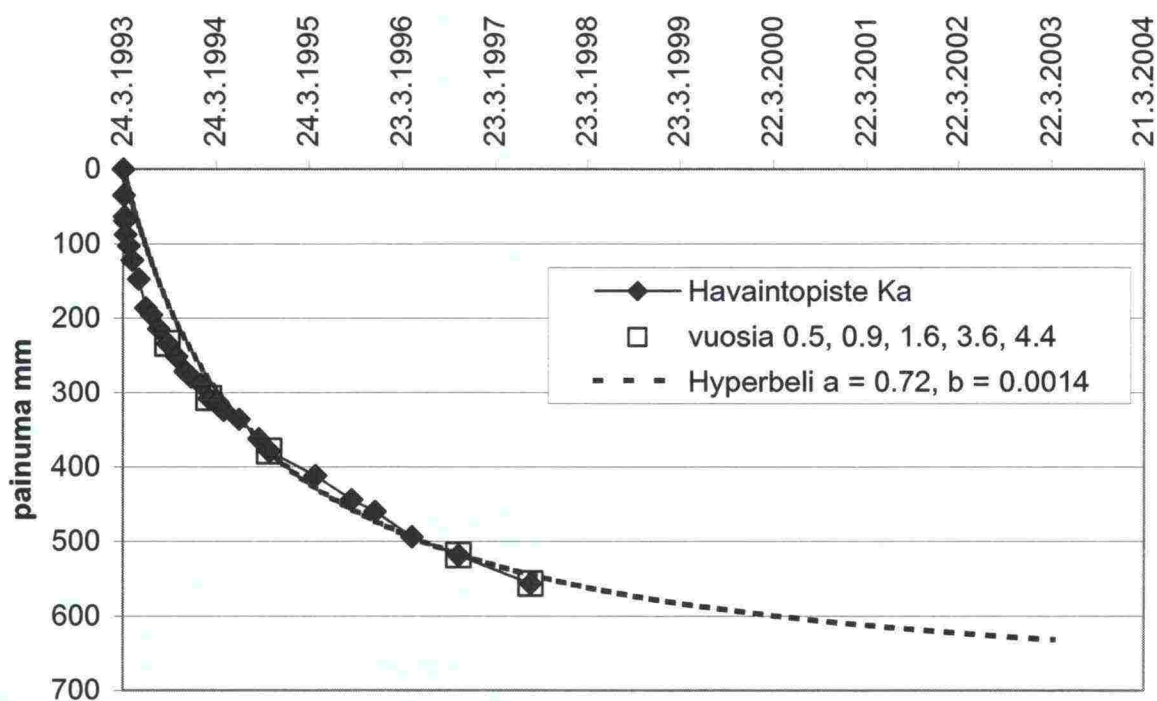
Aika-Painuma kuvaaja



Painumaennuste		Hyperbeli		LIITE II / s. 12			
Koepenger, Murro 4 v havainnot				Havaintopiste Ka		▼	
						pain. t (a)	tod. t
						7.4	7.4
input				output			
	a	b		Painuma		pain7.4	virh. mm
Hyperbeli	0.72	1.39E-03		721		605	ei havaint.



Aika-Painuma kuvaaja

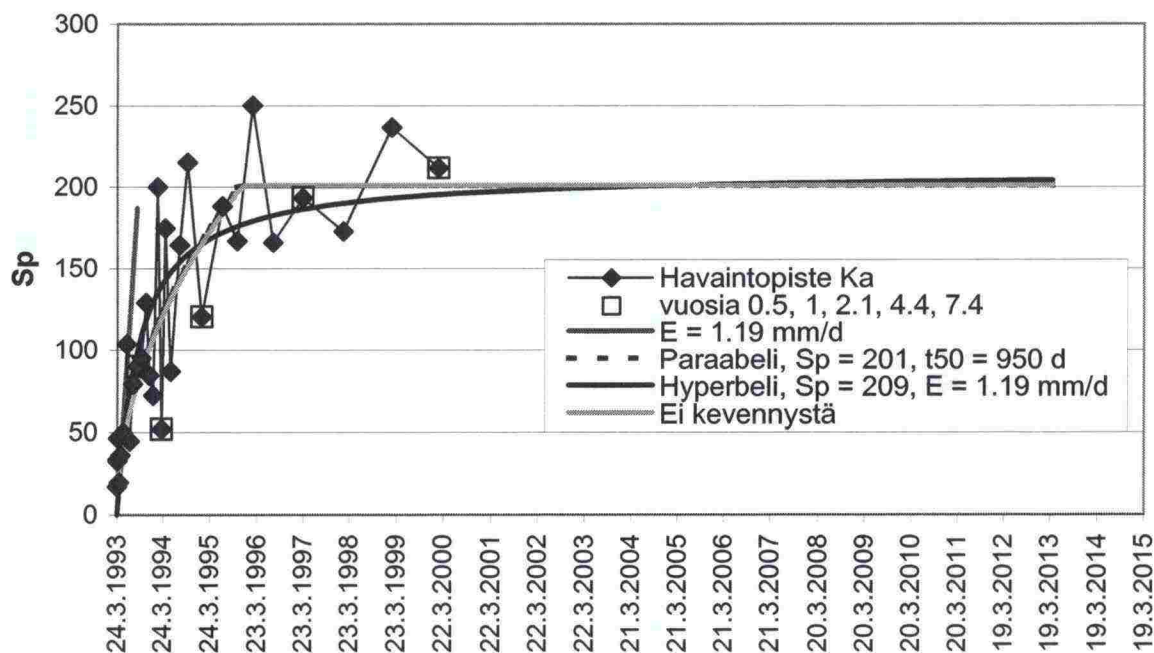


Koepenger, Murro 7,4 v havainnot

Havaintopiste Ka

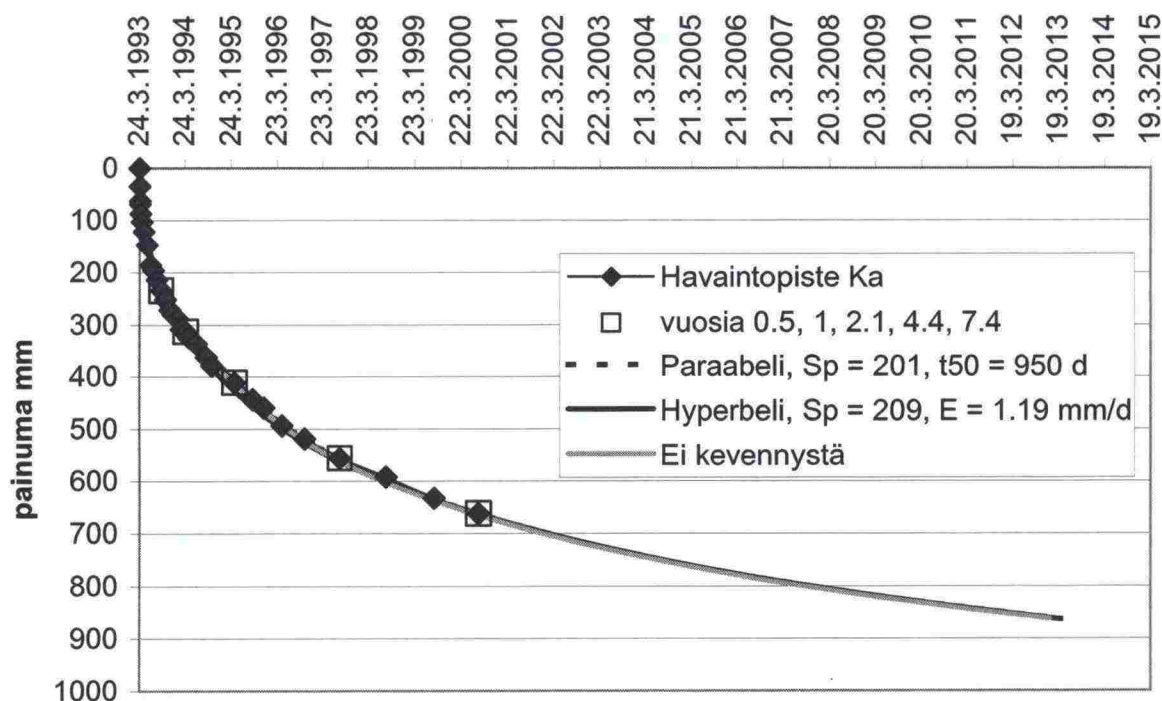


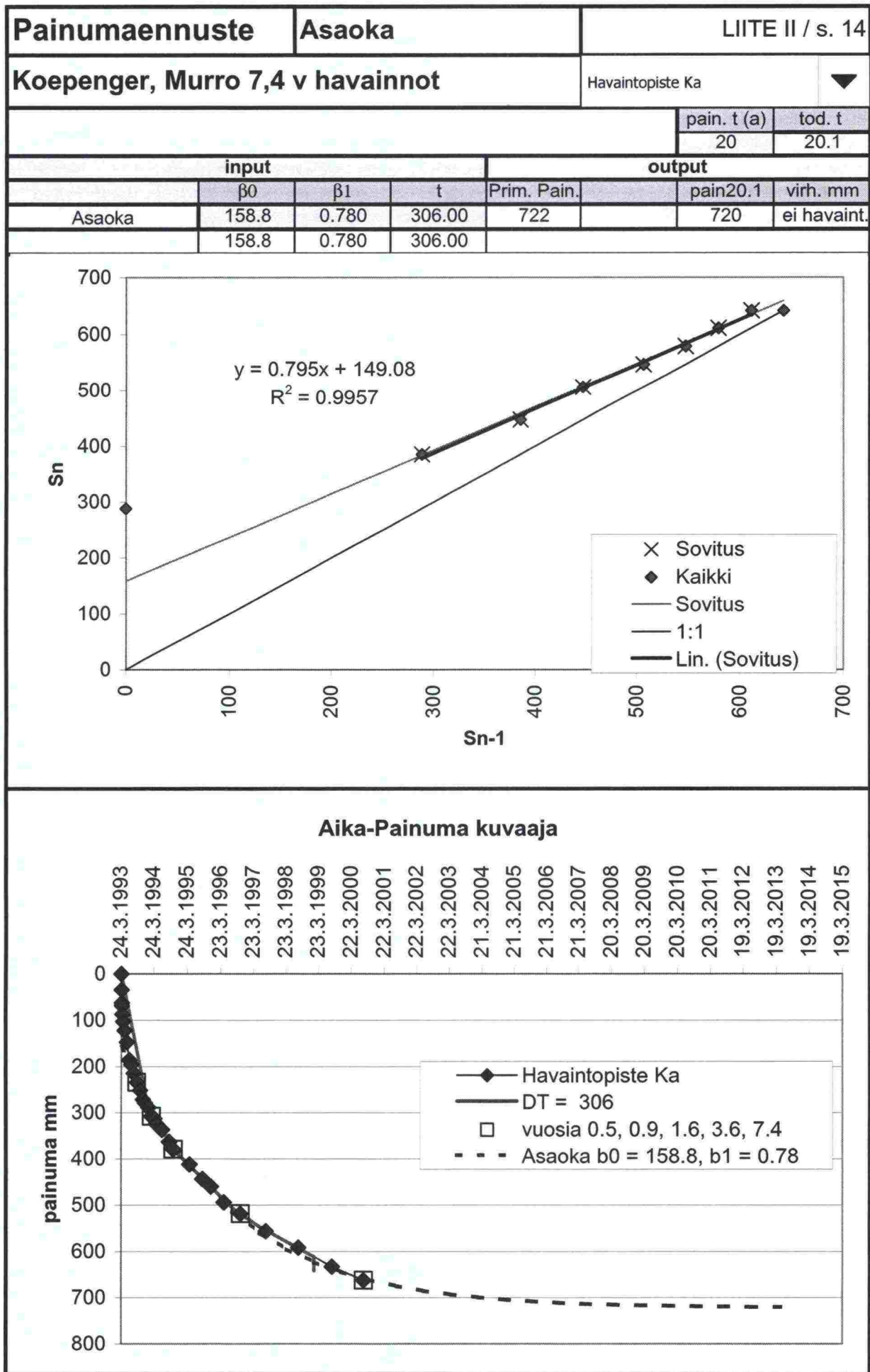
● 1-puol. ku	H	w	m (b = 0)	m	alkupai.	t0 (d)	pain. t (a)	tod. t
○ 2-puol. ku	21	65	8.3...14	7	90	9	20	20
input				80				
	Sp	t50/E	rs	B	c _v	pain. 20	virh. mm	
Paraabeli	201	950	104	0.067	15.4	863	ei havaint.	
Hyperbeli	209	1.19	100	0.070		864	ei havaint.	



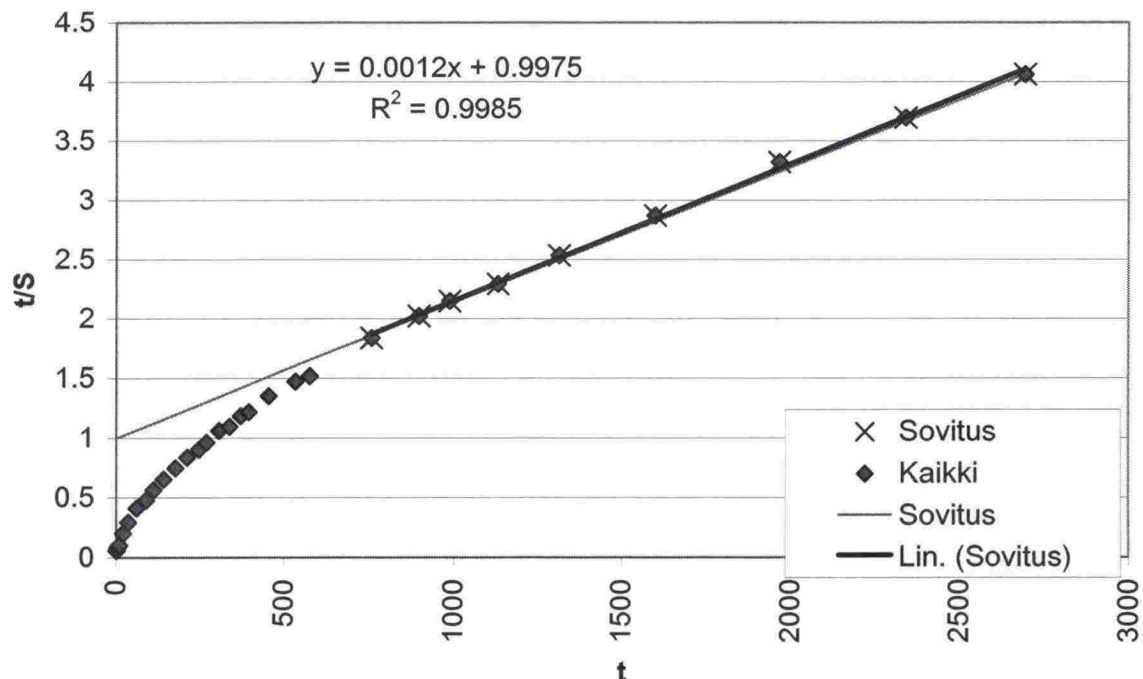
Aika-Painumapotentialiaali kuvaaja

Aika-Painuma kuvaaja





Painumaennuste		Hyperbeli	LIITE II / s. 15	
Koepenger, Murro 7,4 v havainnot			Havaintopiste Ka	▼
			pain. t (a)	tod. t
			20	20
input		output		
	a	b	Painuma	pain20 virh. mm
Hyperbeli	1.00	1.14E-03	877	783 ei havaint.



Aika-Painuma kuvaaja

